

MAESTRIA EN GESTIÓN DE LA INNOVACIÓN TECNOLÓGICA, COOPERACIÓN Y DESARROLLO REGIONAL

**Propuesta de ruta de diseño de nuevos productos y
negocio considerando la evaluación del desempeño
ambiental**

Profundización

Jhonathan Andrés Zapata Giraldo

Director (a):

DIANA CAROLINA RIOS ECHEVERRI

Magister en Ingeniería de Sistemas

**INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO
FACULTAD CIENCIAS ECONÓMICAS Y ADMINISTRATIVAS**

MEDELLÍN, COLOMBIA

2025

Propuesta de ruta de diseño de nuevos productos y negocio considerando la evaluación del desempeño ambiental

Jhonathan Andrés Zapata Giraldo

Trabajo de grado presentada(o) como requisito para optar al título de:
Magíster en Gestión De La Innovación Tecnológica, Cooperación Y Desarrollo Regional.

Director (a):

Magister en Ingeniería de Sistemas Diana Carolina Ríos Echeverri

Codirector (a):

Título (Ph.D., Doctor, Químico, etc.) y nombre del codirector(a)

**INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO
FACULTAD CIENCIAS ECONÓMICAS Y ADMINISTRATIVAS
MEDELLÍN, COLOMBIA
2025**

RESUMEN

El proceso de desarrollo de nuevos productos es esencial para la supervivencia de las empresas, pero, a menudo se enfoca únicamente en la maximización de las ganancias y en la satisfacción del cliente, sin considerar los impactos ambientales negativos que pueden tener sobre el medio ambiente y la sociedad en general. La ausencia de consideración y/o conciencia del desempeño ambiental en el proceso de desarrollo de nuevos productos es una preocupación crítica en la gestión de la innovación empresarial.

El trabajo de grado "Diseño de nuevos productos en consultoría corporativa, con la incorporación de la evaluación del desempeño ambiental" tiene como objetivo general proponer una ruta de diseño de nuevos productos que incorpore la evaluación del desempeño ambiental, con un enfoque en el ámbito de la consultoría corporativa.

Para lograr este objetivo, se han establecido objetivos específicos que buscan caracterizar los métodos e indicadores para la evaluación del desempeño ambiental de productos, diseñar una herramienta de análisis para la identificación de categorías de impactos causados por los productos en cada fase del ciclo de vida, establecer una ruta para la medición del desempeño ambiental del producto según los métodos e indicadores existentes en la literatura y determinar las fases y actividades necesarias para integrar la evaluación del desempeño ambiental en el proceso de diseño de nuevos productos.

Como resultado, se busca proponer una ruta de diseño de productos más sostenibles y respetuosos con el medio ambiente, que permita a las empresas que utilicen el servicio de consultoría tener mayor conciencia en su proceso de desarrollo de producto y para poder mitigar su impacto ambiental y mejorar su imagen corporativa, a través de la integración de la evaluación del desempeño ambiental en todas las fases del proceso de desarrollo de producto.

Palabras clave: Evaluación del Desempeño Ambiental, Desarrollo de Nuevos Productos, Innovación Sostenible, Consultoría Corporativa, Análisis de Ciclo de Vida (ACV), Metodologías de Evaluación Ambiental.

ABSTRACT

The new product development process is essential for the survival of companies, but is often focused solely on profit maximization and customer satisfaction, without considering the negative environmental impacts it may have on the environment and society in general.

The absence of consideration and/or awareness of environmental performance in the new product development process is a critical concern in business innovation management.

The general objective of the thesis "Design of new products in corporate consulting, with the incorporation of environmental performance evaluation. " is to propose a new product design route that incorporates environmental performance evaluation, with a focus on the corporate consulting environment.

To achieve this objective, specific objectives have been established that seek to characterize the methods and indicators for the evaluation of the environmental performance of products, design an analysis tool for the identification of categories of impacts caused by products in each phase of the life cycle, establish a route for the measurement of the environmental performance of the product according to the existing methods and indicators in the literature, and determine the phases and activities necessary to integrate the evaluation of environmental performance in the design process of new products.

As a result, we seek to propose a route for designing more sustainable and environmentally friendly products, which will allow companies using the consulting service to have greater awareness in their product development process and to be able to mitigate their environmental impact and improve their corporate image, through the integration of environmental performance assessment in all phases of the product development process.

Keywords: *Environmental Performance Evaluation, New Product Development, Sustainable Innovation, Corporate Consulting, Life Cycle Assessment (LCA), Carbon Footprint, Circular Economy, Environmental Assessment Methodologies.*

Tabla de contenido

ABSTRACT	iv
Tabla de contenido.....	v
INTRODUCCIÓN.....	10
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	12
Antecedentes	12
Descripción del problema	16
Justificación.....	19
Preguntas de Investigación	22
OBJETIVOS	23
Objetivo General	23
Objetivos Específicos.....	23
1 MARCO CONTEXTUAL: EL DISEÑO DE PRODUCTO	24
1.1 Diseño de nuevos productos.....	24
1.2 Ciclo de vida de un producto	25
2 CARACTERIZACIÓN DE MÉTODOS E INDICADORES PARA LA EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO AMBIENTAL DE PRODUCTOS	29
2.1 La evaluación del desempeño ambiental de nuevos productos.....	30
2.2 Metodología para la caracterización de métodos e indicadores.....	30
Criterios de selección de los artículos.....	31
2.3 Resultados de la revisión de literatura: herramientas, métodos e indicadores para la evaluación del desempeño ambiental	32
2.3.1 Huella de carbono del ciclo de vida de un producto.....	34
2.3.2 Huella de carbono de una organización.....	39
2.3.3 Índice de Desempeño Ambiental - EPI	41
2.3.4 Análisis (o evaluación) del ciclo de vida	45
2.4 Síntesis de revisión de la literatura	47
3 HERRAMIENTA DE ANÁLISIS PARA LA SELECCIÓN DE MÉTODOS DE EVALUACIÓN Y MEDICIÓN DEL DESEMPEÑO AMBIENTAL DE UN PRODUCTO	54
3.1 Matriz de clasificación de métodos por ámbito de evaluación (bienes/servicios, organizaciones y procesos)	55

3.2	Matriz de evaluación aplicación, relevancia y pertinencia del Método de desempeño ambiental.....	58
3.3	Guía integrada LCA–MCA (AHP) para la selección de métodos en contextos empresariales.....	61
3.3.1	Criterios de segundo nivel para el análisis para la selección de método de método de evaluación y medición del desempeño ambiental de un producto.....	62
3.4	Metodología para el diseño de la herramienta LCA–MCA (AHP) para la selección de métodos en contextos empresariales.....	65
3.4.1	Medida de consistencia.....	67
3.4.2	Resultados	69
3.4.3	Introducción a la Herramienta	69
3.4.4	Estructuración del problema.....	70
3.4.5	Asignación de Preferencias	71
3.4.6	Resultado de Priorización.....	73
4	RUTA DE DISEÑO DE PRODUCTOS CON LA INCORPORACIÓN DE LA EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO AMBIENTAL.....	83
4.1	Metodología para proponer la ruta de diseño.....	83
4.2	Resultados.....	85
4.2.1	Fase 1: Selección de método de desempeño ambiental.....	85
4.2.2	Fase 2: Idea (TRL 1 - TRL 2).....	86
4.2.3	Fase 3: Creación (TRL 3 - TRL 4).....	87
4.2.4	Fase 4: Prototipado y Producto Mínimo Viable (TRL 5)	87
4.2.5	Fase 5: Piloto (TRL 6 - TRL 7)	88
4.2.6	Fase 6: Producto (TRL 8 - TRL 9).....	88
4.2.7	Resultado Final	89
5	Conclusiones y recomendaciones.....	90
5.1	Conclusiones	90
5.2	Recomendaciones	91
6	Referencias	92
7	ANEXOS	97
7.1	Anexo A. Reporte de revisión de literatura sobre métodos y herramientas para la evaluación del desempeño ambiental	97

7.2	Anexo B. Herramienta de análisis para la selección de métodos de evaluación y medición del desempeño ambiental de un producto.....	103
-----	---	-----

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Mapa global del ranking de emisiones de CO2 por país.....	14
Figura 2 Proceso de Diseño de Nuevos Negocios.....	18
Figura 3 Representación del ciclo de vida de un producto o servicio Fuente: Life Cycle Initiative.....	28
Figura 4 Huella de carbono del ciclo de vida de un producto.....	35
Figura 5 Límite del sistema del ciclo de vida de un producto.....	36
Figura 6 Marco EPI 2022.....	44
Figura 7 Etapas y aplicaciones de la metodología del análisis de ciclo de vida	46
Figura 8- Los 12 productos finales preseleccionados. Tomado de (Palma et al., 2023)..	50
Figura 9 Los 7 productos intermedios preseleccionado. Tomado de (Palma et al., 2023)	51
Figura 10 Top 15 sectores comprometidos con SBTi en el mundo. Tomado de(Pacto Mundial Red Española & ECODES, 2022)	52
Figura 11 Estructura Jerárquica.	66
Figura 12 Estructura herramienta de análisis para selección de métodos de evaluación y medición del desempeño ambiental de un producto. Elaboración propia.....	70
Figura 13 Árbol Jerárquico análisis multicriterio AHP para selección de método de desempeño ambiental. Elaboración Propia	71
Figura 14 Priorización de criterios A) para el desempeño ambiental seleccionado para el caso hipotético planteado. Elaboración propia.	75
Figura 15 Priorización de criterios B) para el desempeño ambiental seleccionado para el caso hipotético planteado . Elaboración propia	79
Figura 16 Ruta de desarrollo de producto. Tomado de(Antonio et al., 2024)	85
Figura 17 Ruta de diseño de nuevos productos que permiten incorporar la evaluación de desempeño ambiental. Elaboración propia. Adaptado de(Antonio et al., 2024)(Antonio et al., 2024)	89

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Alcances operacionales según el GHG Protocol y ISO 14064-2012.....	39
Tabla 2 Categoría de emisiones de GEI norma ISO 14064 de 2018	40
Tabla 3 Matriz de clasificación de aplicabilidad empresarial vs enfoque. Elaboración propia.....	56
Tabla 4 Matriz de evaluación aplicación, relevancia y pertinencia del Método de desempeño ambiental. Elaboración propia.....	59
Tabla 5 Escala de Saaty. Tomado de (SMITH et al., 2000)	67
Tabla 6 Vector de pesos globales y locales de los subcriterios. Elaboración propia	72
Tabla 7 Matriz de comparaciones pareadas de los Macro criterios con mayor peso en em ambito ambiental	73
Tabla 8 Matriz de comparaciones pareadas de los Macro criterios con mayor peso en el contexto empresarial	78
Tabla 9 Resultado de la revisión de literatura académica. Fuente: Elaboración propia.....	98

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo está dirigido a consultoras corporativas, empresas que prestan servicios para la materialización de ideas y la ejecución de proyectos en diferentes sectores del mercado. La Consultoría Corporativa es un tipo de asesoramiento empresarial que se enfoca en ayudar a las organizaciones a mejorar su desempeño y lograr sus objetivos a largo plazo. Los consultores corporativos trabajan con una amplia variedad de organizaciones, desde pequeñas hasta grandes empresas, y pueden abordar una amplia gama de desafíos empresariales, incluyendo la estrategia, el marketing, las operaciones, la gestión de recursos humanos, la tecnología y la gestión del cambio.

El diseño de nuevos negocios y productos es el proceso de crear y desarrollar ideas innovadoras para nuevos productos o servicios. Este proceso, fundamental para la estrategia empresarial, puede incluir la identificación de oportunidades, la investigación de mercado, la generación y evaluación de ideas, y la implementación de estrategias de comercialización para llevar las nuevas ofertas al mercado. Al diseñar nuevos productos, las empresas pueden satisfacer las necesidades cambiantes de los consumidores y aumentar su cuota de mercado.

Ante la creciente necesidad de integrar la sostenibilidad, este trabajo de grado propone una ruta de diseño para el servicio de consultoría con un enfoque sostenible que se alinee con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030. La Agenda 2030, adoptada por los Estados Miembros de las Naciones Unidas, provee un plan para la prosperidad de las personas y el planeta, abordando desafíos globales como el cambio climático y la degradación ambiental. Este estudio se enfoca particularmente en el ODS 12: "Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles", un aspecto que con frecuencia se omite en el desarrollo tradicional de productos.

Para abordar esta problemática, el documento se estructura de la siguiente manera: El Capítulo 1 proporciona el marco contextual sobre el diseño de nuevos productos, haciendo énfasis en el ciclo de vida de un producto. El Capítulo 2 caracteriza los métodos e indicadores existentes para la evaluación del desempeño ambiental de productos, presentando también una revisión exhaustiva de la literatura. El Capítulo 3 detalla el diseño de una herramienta de análisis multicriterio, basada en el Proceso Analítico Jerárquico (AHP), para seleccionar el método de evaluación más adecuado. Finalmente, el Capítulo 4 propone una ruta de diseño de nuevos productos que integra la evaluación del desempeño ambiental en cada una de sus fases, ofreciendo una solución tangible para que las consultorías incorporen la sostenibilidad de manera efectiva.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Antecedentes

En 2023, el Sexto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) reiteró que las actividades humanas han incrementado el calentamiento global (Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2023) como producto del uso de automóviles, la fabricación de productos o incluso la quema en las cosechas. En la actualidad, el problema persiste y se agrava, lo que es un desafío importante para el desarrollo sostenible (Hermundsdottir & Aspelund, 2021).

El sexto informe del IPCC estimó un aumento de 1,09 °C en la temperatura global entre 2011–2020 respecto a 1850–1900. Este incremento se debe sobre todo al calentamiento adicional desde 2003–2012 (+0,19 °C). Hay más del 50 % de probabilidad de que se alcancen 1,5 °C a corto plazo, incluso con bajas emisiones (Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2023). Lo anterior ha sido respaldado por entidades científicas de todo el mundo y hay consecuencias en los sistemas naturales, como el derretimiento de casquetes polares (DiMento et al., 2014).

El calentamiento global es un tema de gran importancia a nivel mundial. La Convención Marco de Naciones Unidas Contra el Cambio Climático (CMNUCC) deja esto en claro en su acta constitutiva de 1992, en la que precisa el significado del cambio climático como: *“el cambio climático está comprobado que es directamente hecho por las actividades humanas y alteran la composición de la atmósfera global y no tienen nada que ver con el desarrollo mismo de la naturaleza por si sola”* (Naciones Unidas, 1992). Así entonces, los gases de efecto invernadero son generados principalmente por el desarrollo económico y la grave contaminación ambiental que sucede en los países más desarrollados (MINISTERIO DEL AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE, 2021).

De acuerdo con Jusmet (2018), se debe actuar frente al cambio climático, pero con mucha moderación, porque acciones más contundentes implicarían más costes económicos, que

beneficios ambientales. Llama a reducir radicalmente las emisiones para evitar un aumento de la temperatura superior a 1,5 °C, Nordhaus estima que el “óptimo económico”, según la perspectiva coste-beneficio, sería un aumento de unos 3,5 °C para 2100. En este contexto, a nivel global se han creado indicadores del desempeño ambiental, como la huella de carbono que pretende reflejar la totalidad de gases de efecto invernadero emitidos por las personas, organizaciones, evento o producto determinado (Espíndola & Valderrama, 2012). Este indicador es medido siguiendo normativas internacionales reconocidas, tales como GHG Protocol, ISO 14069, ISO 14067, la ISO 2007., PAS 2050, entre otras (De Schryver & Zampori, 2022).

La huella de carbono se mide en masa de CO₂ equivalente y una vez estimado su tamaño y valor es posible implementar una estrategia de reducción o compensación (Presidencia de la Nación Argentina, 2019). La **Figura 1** muestra el ranking del *Climate Change Performance Index* (CCPI) de las emisiones de CO₂ a nivel global, se tienen en cuenta 64 países, siete de los G20 reciben una calificación en el ranking muy baja por su rendimiento, incluida Arabia Saudita (61), Corea (60), Canadá (59), Estados Unidos (57), Australia (56), Federación Rusa (53) y China (50). Los demás países del G20 se dividen a partes iguales en calificaciones medias y bajas. Así mismo, existen 3 países recién añadidos al IPC de este año (2022). Entre ellas, Filipinas sobresale al obtener una calificación alta. Colombia se ubica en la posición 29 con un desempeño medio y una tendencia descendente, mientras que Vietnam aparece en la categoría baja debido a su puntuación muy baja en el indicador de tendencia actual (Burck Jan et al., 2022).

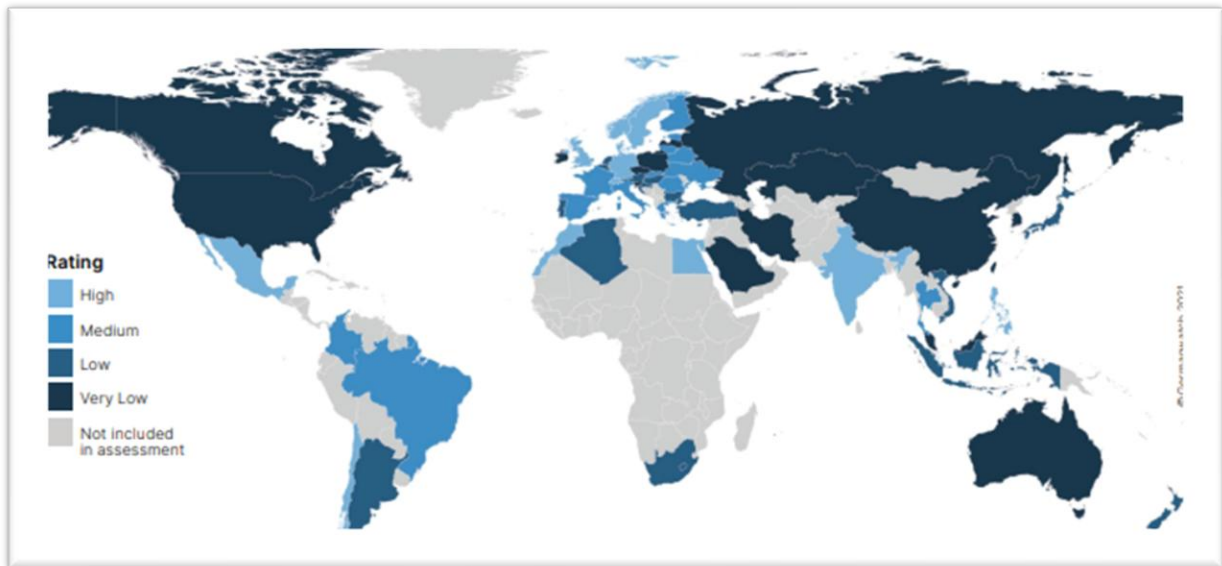


Figura 1 Mapa global del ranking de emisiones de CO2 por país.
Fuente: Cimate Change Performance Index (CCPI)

El calentamiento global y la crisis climática son temas que han cobrado relevancia en cuanto a la sustentabilidad del planeta. Muchos países están reduciendo su Huella de Carbono a través de políticas nacionales que contemplan el inicio de programas para la reducción GEI (Gases de Efecto Invernadero), comercio de emisiones, voluntariado, impuestos al carbono o a la energía, beneficios tributarios y regulaciones y estándares en materia de la disminución de emisiones de CO2 (Burck Jan et al., 2022), para ello, las empresas son requeridas para implementar acciones para reduzcan sus emisiones y asegurar un desempeño exitoso en cuanto a mercados cada vez más competitivos y sostenibles (Aristizábal Alzate et al., 2020).

De esta manera, la medición de la huella de carbono ha tomado mayor importancia en la producción de bienes, servicios y del crecimiento económico (DiMento et al., 2014), está siendo adoptado en las industrias como un indicador de los efectos negativos de la contaminación en la productividad de las personas, ya que se manifiestan principalmente a través de la salud y esto a su vez aumenta el ausentismo dentro de las compañías. Un gran

cuerpo de investigación muestra que la exposición a productos químicos y la contaminación del aire aumenta la incidencia de enfermedades no transmisibles y la mortalidad, un estudio reciente intenta cuantificar el vínculo entre la contaminación del aire y la producción en la economía y estima que un aumento en exposición a PM 2.5 por 10 microgramos por cúbico medidor reduce la producción diaria en un 1% (Schwab, 2019)

Una causa relevante de este problema es la alta demanda de desarrollo de productos y/o servicios por parte de los consumidores, lo que puede llevar a que las empresas prioricen el beneficio económico por encima del impacto ambiental. Asimismo, la falta de cultura ambiental por parte del personal y líderes de las empresas hace que el impacto ambiental no sea una preocupación importante para ellos, lo que puede llevar a la toma de decisiones poco responsables en cuanto al medio ambiente. En este sentido, un estudio publicado en SpringerLink en 2024, encontró que una cultura corporativa sólida contribuye significativamente a mejorar el desempeño ambiental de las organizaciones, evidenciado por una menor liberación de químicos tóxicos. Este hallazgo refuerza la idea de que la ausencia de una cultura organizacional orientada hacia la sostenibilidad puede tener consecuencias negativas directas en el comportamiento ambiental de las empresas (Costa & Opare, 2024).

Incorporar criterios ambientales desde las etapas iniciales del desarrollo de productos no es solo una buena práctica, sino una necesidad si se busca reducir el impacto ecológico de lo que producimos y consumimos. A pesar de esto, muchas de las metodologías actuales; como *Design Thinking*, aún no logran equilibrar bien la innovación enfocada en las necesidades del consumidor con una mirada ambientalmente responsable (Siwiec et al., 2025). Esto dificulta que los negocios diseñen productos que sean sostenibles y, al mismo tiempo, atractivos para el mercado. A esto se suma que, en muchos casos, las herramientas disponibles para evaluar el impacto ambiental no están pensadas para quienes no son expertos, lo que complica aún más la toma de decisiones informadas desde el diseño. Todo esto muestra con claridad la urgencia de crear enfoques más integrales, que permitan a las

empresas considerar tanto la sostenibilidad como la experiencia del usuario desde el primer momento del proceso de desarrollo (Pinkse & Bohnsack, 2021).

Además, estudios recientes indican que la adopción de estrategias de sostenibilidad en estas consultorías es limitada. Un estudio destaca que, aunque existe una creciente conciencia sobre la sostenibilidad, su implementación efectiva en las consultorías de diseño aún enfrenta barreras significativas, como la falta de conocimientos especializados y herramientas adecuadas. Esto subraya la necesidad de desarrollar enfoques más integrados que permitan a las consultorías incorporar consideraciones ambientales desde las primeras etapas del desarrollo de productos, facilitando así la creación de soluciones innovadoras y sostenibles (Hannemann, 2019).

Descripción del problema

El desarrollo de nuevos productos y servicios es fundamental para la innovación y el crecimiento de las empresas, pero, a menudo se enfoca únicamente en aspectos como la rentabilidad y la satisfacción del cliente, sin considerar el desempeño ambiental, que, en algunos casos, puede significar externalidades negativas en la sociedad y el medio ambiente, como la emisión de gases de efecto invernadero y la contaminación del aire y del agua. Por lo tanto, es esencial que las empresas consideren la medición o evaluación del desempeño ambiental del producto en las etapas tempranas del proceso de desarrollo de productos y servicios. El proceso de implementación implica tres etapas mencionadas a continuación (Aqua Fundación, 2021):

1. **Recopilación de datos:** se describen los diferentes métodos que se pueden utilizar para obtener información sobre el producto u organización, como la revisión de documentos, la realización de entrevistas o la realización de mediciones en el lugar. También se explican las consideraciones que deben tenerse en cuenta al seleccionar los datos para incluir en el análisis.
2. **Análisis:** se describe cómo se pueden utilizar los datos recopilados para calcular la huella ambiental del producto u organización. Se describen los diferentes métodos

de cálculo que se pueden utilizar, así como las incertidumbres asociadas con los resultados.

3. **Presentación de resultados:** se discuten las diferentes formas en que se pueden presentar los resultados del análisis, como informes detallados o etiquetas de producto. También se proporcionan ejemplos de cómo se han implementado las metodologías PEF y EEF en diferentes sectores industriales.

Analizar cómo es el desempeño ambiental en el desarrollo de nuevos productos y servicios es cada vez más importante a nivel global, nacional y local. A nivel global, existe una creciente conciencia sobre la necesidad de reducir la huella de ambiental de producto y mejorar la sostenibilidad ambiental, ya que los consumidores demandan cada vez más, productos y servicios que cumplan con estas exigencias. A nivel nacional, en países como Colombia se han implementado regulaciones y políticas para promover la sostenibilidad y la protección del medio ambiente; como la Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos y el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático. A nivel local, en el Valle de Aburrá se han promovido estrategias como las contempladas en el Plan de Acción para el Cambio y la Variabilidad Climática, enfocadas en la mitigación o reducción de gases GEI en la industria.

Las empresas de consultoría corporativa utilizan metodologías y herramientas para desarrollar nuevos negocios y productos. Estas incluyen enfoques como: Canvas, Lean Start up, Lean Canvas, Design thinking, agilismo, entre otras; los cuales tiene como propósito prototipar, testear e iterar en el proceso. La Figura 2 muestra el proceso actual del diseño de nuevos negocios y productos de forma general en una consultoría corporativa. A continuación, se menciona cada uno de los pasos del proceso actual y su descripción:

1. **Investigación de la industria y las tendencias:** se analiza el entorno relacionado con la idea de producto, aplicando técnicas y herramientas de inteligencia competitiva.
2. **Propuesta de valor:** a través de la caracterización de los clientes, se logra establecer elementos y características de la oferta que son considerados de alto valor.

3. **Modelo de negocio (deseabilidad):** Se aplican herramientas etnográficas para validar el problema/ necesidad relacionada con la idea de negocio.
4. **Prototipado:** A través de la creación de prototipos iniciales de la oferta, se definen experimentos para el testeo de la mano del cliente.
5. **Diseño MVP y estrategias de comercialización:** construir el MVP (Producto Mínimo Viable) en su totalidad, para hacer las respectivas validaciones de mercado y poco a poco construir el Roadmap de desarrollo de este.
6. **Presentaciones efectivas:** se recoge todo lo vivido y se reflejan los resultados a través de métricas y aprendizajes para presentarlo en un discurso estructurado a las personas interesadas y tomadoras de decisiones para convencerlas del valor que tiene el proyecto de innovación y poder llevarlas al mercado finalmente.



Figura 2 Proceso de Diseño de Nuevos Negocios

Fuente: Elaboración propia

Como bien se aprecia, la ruta de proceso que se sigue para el diseño de nuevos productos no considera ningún paso relacionado con la identificación, medición o evaluación del

desempeño ambiental del producto, servicio o negocio en diseño, de manera tal que dicho diagnóstico o evaluación conduzca a un rediseño oportuno del producto o del proceso de la empresa asesorada, de ser necesario. La ausencia de este componente en el proceso de consultoría resulta ser un punto crítico con relación a la instrucción global, nacional y local, sobre la incorporación de prácticas, productos, procesos, insumos y otros; que contribuyan a la preservación del planeta desde el sector empresarial con la producción y consumo de bienes y servicios.

De acuerdo con lo anterior, **el problema de investigación a abordar** es la ausencia del componente ambiental en el proceso de desarrollo de nuevos productos y negocios de las empresas de consultoría corporativa centradas en el desarrollo de producto. Este problema puede acarrear consecuencias negativas significativas para la sociedad y el medio ambiente a largo plazo, por lo que es necesario que se incorpore la medición del desempeño ambiental de productos, servicios o negocios, a través de indicadores como, por ejemplo, la estimación de la huella de ambiental de producto desde el proceso mismo de diseño, con el fin de mejorar o repensar las características de fabricación, uso o disposición final, para cumplir las directrices globales, nacionales y locales de mitigación de la crisis climática y de desarrollo sostenible. Esto último es esencial para la preservación del planeta y es una oportunidad para que las empresas se diferencien de la competencia y satisfagan las demandas crecientes de los consumidores por productos y servicios más sostenibles.

Justificación

El proceso de desarrollo de nuevos productos es esencial para la supervivencia de las empresas, pero, a menudo se enfoca únicamente en la maximización de las ganancias y en la satisfacción del cliente, sin considerar los impactos ambientales negativos que pueden tener sobre el medio ambiente y la sociedad en general (Krot & Mazur, 2021). La ausencia de consideración y/o conciencia del impacto ambiental negativo en el proceso de desarrollo de nuevos productos es una preocupación crítica en la gestión de la innovación empresarial, que puede tener consecuencias significativas para la empresa, como daños a la reputación,

sanciones regulatorias, pérdida de clientes y oportunidades de mercado limitadas (Quiroga Martínez, 2007). Por lo que es esencial que las empresas consideren el desempeño ambiental de sus productos desde el inicio del proceso de desarrollo, con el fin de minimizar los riesgos y maximizar los beneficios.

En los últimos años, la preocupación por el medio ambiente ha aumentado, y ha llevado a un mayor enfoque en la sostenibilidad y la responsabilidad social corporativa (RSC). Las empresas están siendo cada vez más presionadas para abordar las cuestiones ambientales y sociales en sus operaciones, y la incorporación de la sostenibilidad en el proceso de desarrollo de nuevos productos se ha convertido en una necesidad (Duque Marqués & Mac Master, 2021). Por otro lado, los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) son la hoja de ruta de los diferentes países afiliados a la Organización de Naciones Unidas (ONU), que en el 2015 aprobaron los 17 objetivos en los que trabajarían durante los próximos 15 años.

Este trabajo de grado, en modalidad de profundización, está orientado a la revisión y estudio de normas, metodologías y herramientas para el diseño de producto con consideraciones ambientales, con especial enfoque en la estrategia corporativa de las empresas que hacen parte del sector de servicios de consultoría. Se espera que el resultado final permita mejorar la línea de consultorías corporativas para el diseño de nuevos productos, que prestan a diferentes empresas del Valle de Aburrá.

Esta mejora en la ruta de diseño de nuevos productos de la consultorías, repercute en una mejora del desempeño ambiental de nuevos productos, con la posible formulación de líneas de acción para operar cambios en las empresas que adquieran el servicio de consultoría corporativa dentro del Valle de Aburrá, de manera que se promueva el tener una cultura empresarial enfocada al beneficio del medioambiente y una probable reducción del impacto que generan diariamente, apuntando directamente al duodécimo Objetivo De Desarrollo Sostenible ODS 12: *“garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles”* (Naciones Unidas, 2022)

Este trabajo tiene relación con tres ODS: 12-Producción y consumo responsables, 9- Industria, innovación e infraestructura y 13- Acción por el clima.

Por último, se debe mencionar El Design Thinking como metodología de resolución de problemas y creación de soluciones innovadoras, que se enfoca en el usuario y en la empatía. Es un enfoque multidisciplinario que involucra diferentes áreas como el diseño, la tecnología, los negocios, la psicología y la sociología (Aqua Fundación, 2021). En el libro "Change by Design", escrito por Tim Brown, CEO de la firma de diseño e innovación IDEO. Menciona la importancia del Design Thinking como una herramienta para la innovación y el cambio social. Brown argumenta que se puede y debe ser utilizado para resolver problemas complejos, no sólo para crear objetos estéticamente atractivos (Brown, 2019).

Al enfocarse en el usuario y en la empatía, el Design Thinking busca entender las necesidades y deseos del usuario de manera profunda y completa, lo que incluye las preocupaciones ambientales y de sostenibilidad. Esto permite, en el diseño de un producto nuevo, considerar los aspectos ambientales desde la concepción del producto, en lugar de simplemente tratar de remediar los problemas ambientales después de que se haya creado el producto. Además, el Design Thinking promueve la experimentación continua y la creación de prototipos, lo que permite a los diseñadores probar diferentes soluciones y hacer ajustes para minimizar el impacto ambiental del producto. Esto puede incluir la selección de materiales más sostenibles, la reducción del desperdicio, la mejora de la eficiencia energética, entre otros aspectos.

Preguntas de Investigación

¿Cómo intervenir el proceso de diseño de nuevos negocios y productos de la consultoría corporativa para considerar requisitos y normas ambientales de nivel global, nacional y local, que apuntan a mejores estándares de diseño?

¿Qué actividades se deben incorporar en el proceso de diseño de producto actual para integrar la evaluación del desempeño ambiental?

OBJETIVOS

Objetivo General

Proponer una ruta de diseño de nuevos productos, de uso en consultoría corporativa, que incorpore la evaluación del desempeño ambiental.

Objetivos Específicos

1. Caracterizar los métodos e indicadores para la evaluación del desempeño ambiental de productos.
2. Diseñar una herramienta de análisis para la selección de métodos de evaluación y medición del desempeño ambiental de un producto.
3. Determinar fases, actividades y resultados de la ruta de diseño de nuevos productos que permiten incorporar la evaluación del desempeño o ambiental de nuevos productos.

1 MARCO CONTEXTUAL: EL DISEÑO DE PRODUCTO

1.1 Diseño de nuevos productos

La creación o mejora de productos con el fin de satisfacer las necesidades del consumidor y ser factibles en cuanto a su producción y comercialización se conoce como diseño de producto. Este proceso implica el desarrollo de ideas, la investigación de mercado, la construcción de modelos preliminares, su evaluación y repetición hasta lograr un producto final que sea atractivo, funcional y rentable (Aqua Fundación, 2021).

El diseño de un producto implica un proceso que puede variar en función del tipo de producto y de la empresa que lo desarrolla, pero generalmente incluye las siguientes etapas(Lockwood, 2010):

1. Identificación de las necesidades del mercado y del usuario.
2. Generación de ideas y conceptos.
3. Selección de los conceptos más viables.
4. Diseño y creación de prototipos.
5. Evaluación y refinamiento del diseño.
6. Pruebas de mercado.
7. Lanzamiento del producto y seguimiento de su desempeño.

Durante todo el proceso, se debe tener en cuenta la viabilidad técnica y económica del producto, así como su capacidad para satisfacer las necesidades del usuario y ser competitivo en el mercado(Lockwood, 2010).

Existen varias metodologías que se utilizan en el diseño de productos, algunas de las más comunes son(Maldona Morales et al., 2021):

1. **Design thinking:** Es un enfoque centrado en el usuario que busca comprender las necesidades del usuario y encontrar soluciones innovadoras y creativas para

satisfacerlas. Este enfoque involucra la colaboración y la iteración constante para desarrollar y mejorar las ideas.

2. **Lean product development:** Esta metodología se enfoca en reducir el tiempo y los costos de desarrollo del producto, eliminando los desperdicios y enfocándose en la eficiencia y la calidad. Se basa en el uso de procesos iterativos y en la colaboración entre diferentes áreas de la empresa.
3. **Six Sigma:** Es una metodología que se enfoca en la calidad del producto y en la eliminación de errores y defectos. Se basa en el análisis de datos y en la mejora continua de los procesos para alcanzar la excelencia en la calidad del producto.
4. **Stage-gate:** Esta metodología se divide en etapas y puertas, lo que permite el control y la evaluación constante del proceso de desarrollo del producto. Cada etapa tiene objetivos y resultados específicos que deben cumplirse antes de avanzar a la siguiente etapa.
5. **Agile:** Esta metodología se enfoca en la flexibilidad y la adaptabilidad, lo que permite responder rápidamente a los cambios y a las necesidades del mercado. Se basa en la colaboración y en la iteración constante para lograr un proceso de desarrollo del producto ágil y eficiente.

1.2 Ciclo de vida de un producto

El ciclo de vida de un producto (CVP), también conocido como “de la cuna a la tumba”, hace referencia al conjunto de etapas consecutivas e interrelacionadas por las que pasa un producto, desde la adquisición de materias primas hasta su disposición final (ONU, 2024). Este enfoque es fundamental para comprender y evaluar los impactos ambientales, sociales y económicos asociados a cada fase de la vida del producto, lo que resulta especialmente relevante para el diseño de nuevos bienes y servicios en un contexto de sostenibilidad.

De acuerdo con la Guía para responsables de políticas sobre el Análisis de Ciclo de Vida del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (ONU, 2024), el análisis de ciclo de vida (ACV) constituye la “recopilación y evaluación de las entradas, salidas y los potenciales impactos ambientales de un sistema de producto a lo largo de su ciclo de vida” (p. 5). Esta perspectiva permite identificar puntos críticos en los que la intervención puede maximizar la reducción de impactos y orientar decisiones estratégicas tanto en empresas como en políticas públicas. En el marco de la presente investigación, este enfoque servirá como base para la propuesta de una ruta de diseño de nuevos productos, incorporando indicadores de desempeño ambiental y herramientas de análisis que faciliten la toma de decisiones en consultoría corporativa

El CVP se puede dividir en varias fases principales que, en conjunto, conforman una mirada integral del sistema producto-ambiente:

1. **Extracción y adquisición de materias primas.** Está etapa inicial incluye la obtención de recursos naturales como minerales, madera, petróleo, gas o productos agrícolas. Según UNEP (2024), en este punto se generan impactos significativos como la degradación del suelo, la pérdida de biodiversidad, la contaminación de fuentes hídricas y el agotamiento de recursos no renovables. Identificar y mitigar estos efectos es esencial para garantizar que el proceso productivo arranque bajo criterios de sostenibilidad.
2. **Procesamiento y fabricación.** En esta fase, los recursos obtenidos se transforman en productos intermedios o finales mediante procesos industriales. Se requieren grandes cantidades de energía y agua, además de que se generan emisiones atmosféricas, residuos sólidos y aguas residuales. El embalaje del producto, incluido en esta etapa, también constituye una fuente relevante de impacto ambiental (ONU, 2024). Desde la perspectiva de diseño de nuevos productos, aquí se abren oportunidades para incorporar materiales alternativos, procesos más limpios y soluciones de ecodiseño.

3. **Distribución y transporte.** El traslado del producto desde la planta de producción hasta los puntos de venta y el consumidor final contribuye de manera significativa a las emisiones de gases de efecto invernadero. El impacto varía según las distancias recorridas, los modos de transporte empleados (terrestre, marítimo o aéreo) y la eficiencia logística (ONU, 2024). La optimización de esta fase es clave dentro de la ruta de diseño sostenible, considerando alternativas como la reducción de la huella logística, el uso de biocombustibles o la localización estratégica de la producción.
4. **Uso y consumo.** En esta etapa, el impacto depende directamente del tipo de producto. Por ejemplo, los electrodomésticos consumen energía durante toda su vida útil, mientras que la ropa requiere agua, detergentes y energía en sus procesos de mantenimiento. Analizar esta fase permite identificar los patrones de uso del consumidor y definir mejoras en eficiencia, durabilidad y reparabilidad (ONU, 2024). Dentro de los objetivos de esta tesis, esta etapa es fundamental para vincular indicadores de desempeño ambiental que orienten el rediseño de productos.
5. **Fin de la vida útil y eliminación.** Una vez que el producto deja de ser funcional, existen diferentes alternativas:
 - **Reutilización y reciclaje:** El reacondicionamiento o la recuperación de materiales contribuyen a cerrar el ciclo y disminuir la extracción de nuevas materias primas.
 - **Disposición final:** La incineración y el vertido en rellenos sanitarios siguen siendo prácticas comunes, aunque ambas generan impactos ambientales adversos (emisiones atmosféricas, contaminación de suelo y agua).

Según UNEP (2024), priorizar estrategias de economía circular en esta etapa es crucial para reducir el impacto global de los productos y garantizar una gestión responsable de los recursos

A continuación, se presenta la representación esquemática del ciclo de vida de un producto, tomada de la Guía para responsables de políticas sobre el Análisis de Ciclo de Vida:

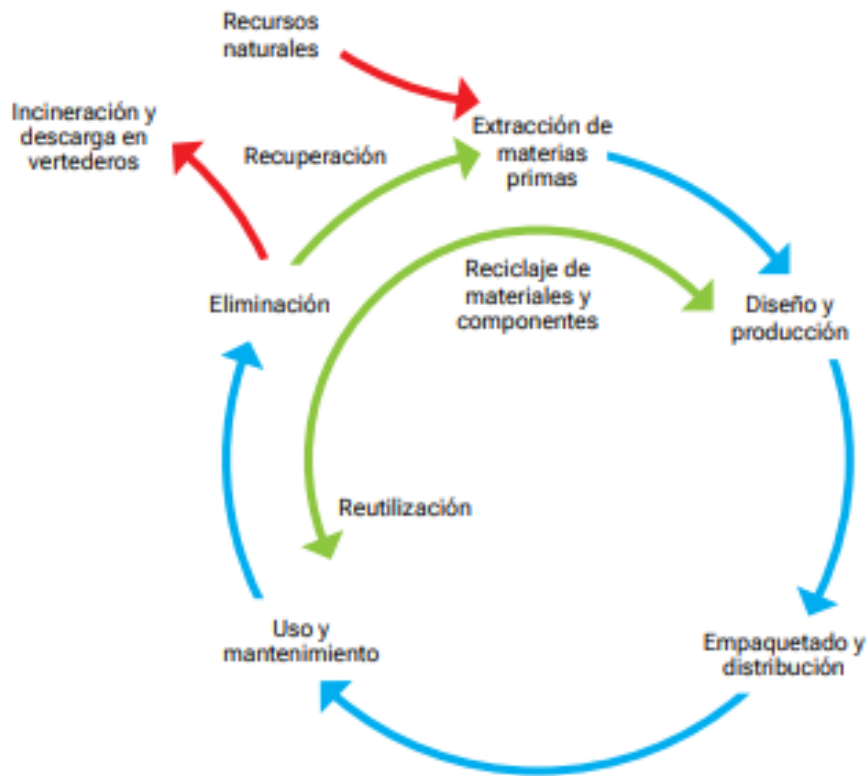


Figura 3 Representación del ciclo de vida de un producto o servicio Fuente: Life Cycle Initiative

El conocimiento y análisis de cada etapa del ciclo de vida no solo permiten identificar los impactos asociados, sino también incorporar criterios ambientales en el diseño de nuevos productos. El ciclo de vida provee la base conceptual para caracterizar los métodos e indicadores ambientales, ya que cada fase ofrece oportunidades de medición y control.

Conocer y analizar cada una de estas etapas permite a las empresas y a los consumidores tomar decisiones más informadas para reducir el impacto ambiental.

2 CARACTERIZACIÓN DE MÉTODOS E INDICADORES PARA LA EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO AMBIENTAL DE PRODUCTOS

Este capítulo responde al primer objetivo específico —caracterizar métodos e indicadores de desempeño ambiental de productos— y se organiza en tres partes: (i) un marco conceptual que define alcance, principios y categorías de métodos e indicadores y su relación con el ciclo de vida; (ii) la metodología de caracterización, con criterios, fuentes y procedimientos para identificar, clasificar y comparar su aplicabilidad y robustez en consultoría corporativa; y (iii) los resultados, que sintetizan los métodos e indicadores seleccionados, sus fortalezas y limitaciones, y las implicaciones para la herramienta y la ruta de diseño de los capítulos siguientes.

Además, se introduce la importancia de evaluar el desempeño ambiental de los productos y cómo esta evaluación se integra dentro de los esfuerzos globales para lograr un desarrollo sostenible. Se establece el contexto y la relevancia de la investigación, delineando el panorama actual y la necesidad de métodos e indicadores efectivos.

Finalmente, el capítulo se enfoca en la identificación de las categorías de impacto ambiental, basándose en las fases del ciclo de vida del producto. Este proceso implica un análisis detallado de los posibles efectos ambientales asociados con cada etapa del ciclo de vida del producto tenidos en cuenta en la revisión literaria, desde su concepción hasta su disposición final. La identificación de estas categorías es fundamental, ya que proporciona una estructura para evaluar de manera exhaustiva el desempeño ambiental del producto. Se subraya la importancia de este paso, ya que establece la base para una evaluación ambiental precisa y completa, permitiendo así identificar áreas clave para la mejora y la innovación en términos de sostenibilidad.

2.1 La evaluación del desempeño ambiental de nuevos productos

El **desempeño ambiental de un producto** se define como la medición y evaluación de los impactos asociados a todo su ciclo de vida, desde la extracción de materias primas hasta su disposición final. Para ello, se analizan factores como el consumo de recursos naturales, las emisiones de gases de efecto invernadero, la generación de residuos y la toxicidad de los materiales. El objetivo principal es identificar oportunidades de mejora y fomentar la sostenibilidad en el diseño, producción y gestión de productos (United Nations Environment Programme (UNEP), 2021).

2.2 Metodología para la caracterización de métodos e indicadores

Se realizó una revisión de literatura para la identificación y caracterización de métodos e indicadores para la evaluación del desempeño ambiental de productos. La revisión de literatura se dividió en las siguientes actividades para facilitar la búsqueda:

- a) **Identificar el objetivo de tu revisión de literatura:** ¿Qué se pretende lograr con la revisión de literatura? ¿Cuál es la pregunta de investigación que se desea responder?
- b) **Seleccionar fuentes de información:** Identificar las fuentes de información relevantes para el objetivo. Se buscará en bases de datos en línea, revistas científicas, libros, entre otros, dispuestos por la institución.
- c) **Realizar la búsqueda:** Se utilizarán palabras claves como: “diseño de producto”, “Desempeño ambiental de un producto”, “Indicadores de desempeño ambiental, etc. A continuación, se revisan los títulos, resúmenes y palabras clave de los artículos para determinar si son relevantes.
- d) **Análisis de la información:** Lectura de los artículos seleccionados. Asegurando un entendimiento de los conceptos y las metodologías utilizadas en los estudios.

- e) **Organización y síntesis de la información:** Identificar los documentos más importantes, conclusiones y tendencias en la evaluación del desempeño ambiental de productos. Resumiendo, las metodologías utilizadas y los resultados obtenidos en los diferentes estudios.

Criterios de selección de los artículos

Para fundamentar esta revisión, se recurrió a fuentes académicas y profesionales de la siguiente manera:

1. Para información académica estructurada:
 - Scopus
 - Google académico
 - Elicit
 - Bibliotecas digitales; Cambridge University Press, Journal of Cleaner Production, Sustainable Production and Consumption, Ecological Engineering and Environmental Technology, International Journal of Innovation, Creativity and Change...
2. Información no estructurada – literatura gris
 - Páginas gubernamentales; Área metropolitana Valle de Aburra, Comisión Europea, Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, Naciones Unidas...
 - Informes de consultoría
 - Blogs ambientales
 - Normativas

Estas fuentes permitieron acceder a una diversidad de perspectivas y estudios recientes, garantizando una comprensión profunda y actualizada del tema.

La estrategia de búsqueda se articuló en torno a términos clave, tales como "evaluación del desempeño ambiental de los productos", "índice de desempeño ambiental", y "desempeño ambiental y productos". Este enfoque permitió filtrar y seleccionar artículos y archivos cuya

relevancia y pertinencia se alinean estrechamente con los objetivos de esta investigación, asegurando que el material recopilado aportara valor significativo al estudio.

La fase de análisis implicó una revisión meticulosa de los estudios seleccionados, prestando especial atención a las metodologías empleadas, así como a los conceptos clave abordados en cada uno. Este proceso no solo enriqueció el entendimiento teórico y práctico del investigador sobre la materia, sino que también facilitó la identificación de patrones, tendencias y lagunas en la literatura existente.

El resultado de esta tarea fue la compilación y síntesis de la información en una matriz analítica, diseñada para ofrecer una visión clara y organizada de las principales conclusiones, metodologías y resultados derivados de la investigación previa. Esta síntesis no solo refleja el estado actual del conocimiento en el campo, sino que también establece un firme fundamento sobre el cual se pueden construir futuras investigaciones, especialmente en el ámbito del diseño sostenible de productos en el sector consultivo.

2.3 Resultados de la revisión de literatura: herramientas, métodos e indicadores para la evaluación del desempeño ambiental

Existen diversos enfoques de evaluación medioambiental aplicados a nivel de producto en el contexto de la economía circular. Estos incluyen:

- **Metodologías de medición de la huella:** como la **huella de carbono**, la **huella hídrica**, la **huella material** y la **huella ecológica**, que cuantifican el impacto ambiental en diferentes categorías.
 - **Huella de carbono:** Esta metodología mide las emisiones de gases de efecto invernadero (principalmente dióxido de carbono) que se generan en la producción, transporte y uso del producto.

- **Huella hídrica:** Esta metodología mide la cantidad de agua utilizada en la producción del producto y su impacto en la calidad y disponibilidad del agua.
- **Huella ecológica:** Esta metodología mide la cantidad de recursos naturales utilizados en la producción del producto y su impacto en la biodiversidad y los ecosistemas.
- **Análisis basados en energía y exergía:** que evalúan la eficiencia del uso energético a lo largo del ciclo de vida de un producto.
- **Análisis basados en materiales y sustancias:** centrados en el uso y la gestión de recursos y químicos.
- **Evaluación de indicadores:** como el **índice de proceso sostenible**, el **índice de área de disipación** y el **indicador de desempeño ambiental**, que ofrecen mediciones específicas del rendimiento.
- **Evaluación del Ciclo de Vida (ECV):** un método integral que analiza los impactos ambientales desde la extracción de materias primas hasta el fin de la vida útil del producto.

Esta metodología evalúa el impacto ambiental de un producto durante todo su ciclo de vida, desde la extracción de materias primas hasta su disposición final. Se consideran diferentes aspectos como el consumo de energía, emisiones de gases de efecto invernadero, contaminación del aire, agua y suelo, y la gestión adecuada de residuos.

Todos estos métodos ayudan a medir el desempeño ambiental de un producto dentro de un marco de economía circular, tal como lo señalan Harris et al. (2021). La economía circular es un modelo de producción y consumo que busca desacoplar la generación de residuos del crecimiento económico mediante la prevención de desechos, la adopción de prácticas

empresariales sostenibles y la gestión integral que trata los residuos como recursos valiosos, promoviendo reducir, reutilizar, reparar y reciclar para prolongar la vida útil de productos y materiales y minimizar impactos en clima, contaminación y biodiversidad(Lenkiewicz, 2024).

2.3.1 Huella de carbono del ciclo de vida de un producto

El concepto de huella de carbono surge como una herramienta para medir la cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) que son liberadas a la atmósfera como resultado de las actividades humanas. En 2001, la empresa británica de consultoría medioambiental Best Foot Forward desarrolló un marco para calcular la huella de carbono de una organización, que se convirtió en el primer estándar de huella de carbono disponible públicamente (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2023).

Desde entonces, el concepto de huella de carbono se ha extendido a nivel mundial y ha sido utilizado por empresas, gobiernos y organizaciones no gubernamentales para evaluar su impacto ambiental y diseñar estrategias para reducir sus emisiones de GEI.

Tiene en cuenta 6 tipos de gases:

1. Dióxido de Carbono (CO₂)
2. Metano (CH₄)
3. Óxido Nitroso (N₂O)
4. Hidrofluorocarbonos (HFC)
5. Perfluorocarbonos (PFC)
6. Hexafluoruro de azufre (SF₆)

La medida de las emisiones totales de gases de efecto invernadero generadas por un producto a lo largo de su vida útil, desde la obtención de materias primas hasta su desecho, es lo que se conoce como la huella de carbono del ciclo de vida del producto. Esta medida se expresa en términos de equivalentes de dióxido de carbono (CO₂e)(Manfredi et al., 2012). En la siguiente imagen se muestra de una manera más clara:

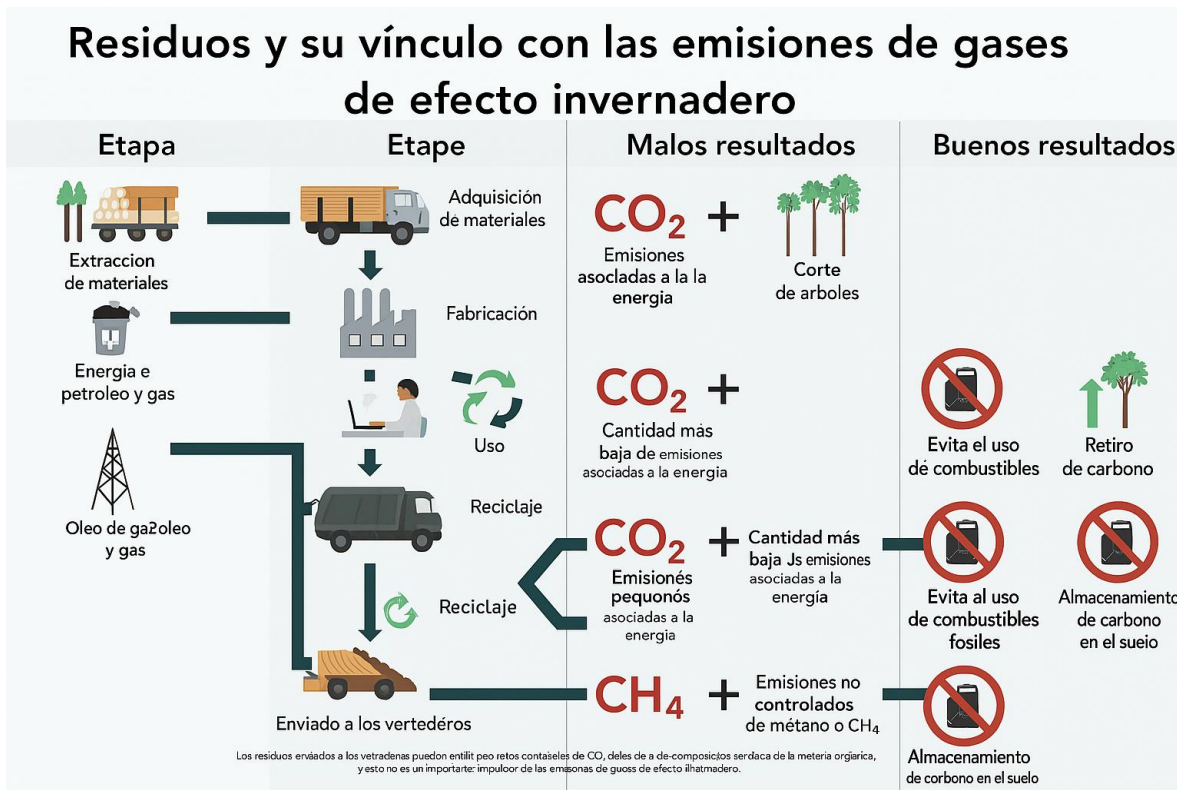


Figura 4 Huella de carbono del ciclo de vida de un producto
Fuente: EPA (Environmental Protection Agency)

Las huellas de productos deben asociarse con un alcance o límite, siendo los más comunes (Carbon Trust, 2020):

Cradle to gate (De la cuna a la puerta): se utiliza principalmente para productos de empresa a empresa (B2B). Esto mide las emisiones totales de gases de efecto invernadero desde la extracción de materias primas hasta la fabricación del producto hasta la puerta de la fábrica.

Cradle to grave (De la cuna a la tumba): se utiliza principalmente para productos de empresa a consumidor (B2C). Mide las emisiones totales de gases de efecto invernadero desde la extracción de materias primas hasta la fabricación, distribución, uso y eventual eliminación del producto

La **Figura 5** ilustra el límite del sistema del ciclo de vida de un producto ficticio. La línea discontinua roja muestra el límite del sistema de la cuna a la puerta, y la línea discontinua negra muestra el límite del sistema de la cuna a la tumba.

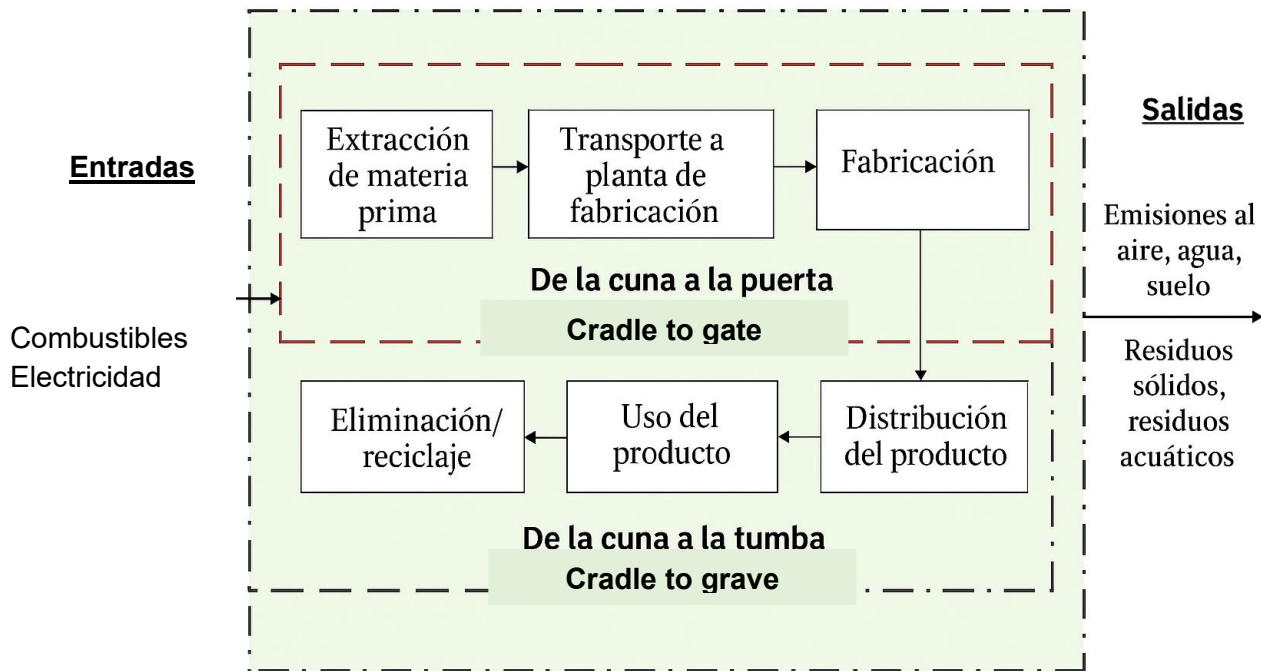


Figura 5 Límite del sistema del ciclo de vida de un producto.
Tomado de (Uddin & Wright, 2022)

Se destacan dos grupos de metodologías para la medición de huella de carbono de un producto (De Schryver & Zampori, 2022):

- **Grupo 1:** Metodologías de un solo tema, que cubren solo las emisiones y los impactos relacionados con el cambio climático.
- **Grupo 2:** Metodologías que tienen un alcance más amplio, cubriendo temas ambientales más allá del cambio climático. Puede utilizar el indicador de cambio climático de estas metodologías para determinar la huella de carbono de un producto.

2.3.1.1 Metodologías del Grupo 1

1. Como parte de la mitigación se crean un conjunto de estándares con reconocimiento internacional que son las **normas ISO**, con un gran porcentaje de aceptación a nivel mundial, permite la compatibilización entre diversos países y sistemas en función de la medición de huella de carbono, dos ejemplos de estas son:
 - **ISO14067:** Establece los principios, requisitos y directrices para la cuantificación de la huella de carbono de productos (PCF) y la comunicación de información sobre la huella de carbono de productos. proporciona un marco para cuantificar la huella de carbono de los productos a lo largo de su ciclo de vida, desde la extracción de materias primas hasta la disposición final (ISO, 2018).
 - **ISO14064:** Establece los principios y requisitos para el diseño, desarrollo, gestión y reporte de los inventarios de gases de efecto invernadero (GEI) y la evaluación de proyectos de reducción o eliminación de emisiones de GEI((ISO, 2019).
2. **PAS 2050** desarrollada por Carbón Trust (Reino Unido), que tiene por objetivo poder medir le ciclo de vida de las emisiones que son provenientes de las actividades relativas tanto a la producción y enfoqué capital; y el GHG Protocolo desarrollado por el World Economic Business Council for Sustainable Development (WEBCSD) y el World Resources Insititute (WRI) ((Garcia & Freire, 2014)
3. **WBCSD (2011) GHG protocol Product Standard.** Es una herramienta desarrollada por el World Resources Institute (WRI) y el World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) que proporciona un marco para medir y comunicar la huella de carbono de los productos a lo largo de su ciclo de vida (Callahan et al., 2011).

2.3.1.2 Metodologías del Grupo 2

1. **The Product Environmental Footprint (PEF).** Este método recomendado por la Unión Europea para realizar estudios del ciclo de vida del producto tiene como objetivo armonizar los estándares existentes. Requiere 16 categorías de impacto

para calcularse, pero algunas propuestas legislativas actuales recomiendan el método con el cambio climático como único indicador para informar el Huella de carbono de un producto (Manfredi et al., 2012).

2. **National standards such as BP X30-323-0.** Este estándar fue desarrollado por el gobierno francés (AFNOR), probado en 2011 y finalizado en 2015. Al igual que el PEF, cubre una serie de categorías de impacto. El indicador de cambio climático se puede informar por separado si es necesario (Chomkham Sri & Pelletier, 2011).
3. **EN 15804.** Este es el estándar europeo que proporciona reglas de categoría de productos básicos para todos los productos y servicios de construcción. Al igual que otros métodos multicriterio, cubre un conjunto de indicadores de impacto ambiental obligatorios, incluido el cambio climático. Si bien todos los indicadores ambientales deben calcularse e informarse, el indicador de cambio climático se puede usar para cuantificar la huella de carbono del producto en cuestión (Comité técnico CTN 198 Sostenibilidad en la construcción, 2020).
4. La **Declaración Ambiental de Producto (DAP)**, conocida como *Environmental Product Declaration* (EPD), es una herramienta global y estandarizada bajo la norma ISO 14025. Se basa en la evaluación del ciclo de vida para comunicar de forma transparente el desempeño ambiental de un producto o servicio.

Los estándares previamente mencionados se fundamentan en los principios establecidos por las normas ISO 14040 e ISO 14044 y buscan estar en sintonía con los últimos informes del IPCC. A pesar de que las metodologías no son idénticas, los creadores de las mismas (BSI, WRI/WBCSD, ISO, AFNOR y la CE) trabajaron para lograr una mayor concordancia entre ellas.

Cada metodología incluye requisitos específicos para abordar temas relevantes relacionados con la huella de carbono, como el cambio en el uso del suelo, la absorción y

emisión de carbono (biogénico), la compensación, las reservas de carbono en el suelo, la electricidad renovable y los factores de caracterización que deben utilizarse para el carbono biogénico.

Por otro lado, existen seis temáticas de actuación que incluye los ejes de actuación del Pacto Verde Europeo “European Green Deal” (Departamento de Desarrollo Económico, 2023):

- Transparencia y posicionamiento
- Ecodiseño para una economía circular
- Materias primas secundarias y gestión de residuos
- Descarbonización con enfoque de ciclo de vida
- Zero Pollution
- Finanzas sostenibles

2.3.2 Huella de carbono de una organización

La mayoría de los estándares mundiales diferencia las emisiones en dos categorías; **emisiones directas** que provienen de fuentes que son propiedad o están controladas por las empresas y las **emisiones indirectas** que son debidas a la actividad de la empresa, pero tienen lugar en fuentes que no son propiedad ni están controladas por la empresa (Kean Fong et al., 2021).

El GHG Protocol (estándar que se hizo para calcular la huella de carbono) distribuye las emisiones en tres alcances diferentes mostrados en la siguiente tabla:

Tabla 1 Alcances operacionales según el GHG Protocol y ISO 14064-2012

Definición	
Alcance 1	Emisiones directas de GEI. Las emisiones directas provienen de fuentes que son propiedad de o están controladas por la empresa
Alcance 2	Emisiones indirectas de GEI asociadas a la electricidad. Estas emisiones provienen de la generación de la electricidad, calor o vapor adquirida y consumida por la empresa
Alcance 3	Otras emisiones indirectas. Estas emisiones son consecuencia de la actividad de la empresa, pero ocurren en fuentes que no son propiedad ni están controladas por la empresa.

Para el cálculo de la huella de carbono se utiliza la siguiente formula ((Kean Fong et al., 2021):

$$\text{Emisiones de GEI (ton CO2eq)} = \text{Dato de actividad (empresa)} * \text{Dato de emisión} * \text{GWP}$$

Donde:

- **Datos de actividad:** Medida cuantitativa de la actividad que produce emisiones. Los datos de la actividad son relativos al consumo de materias primas, productos, energía y transporte (entre otros) que permiten cuantificar las emisiones de GEI.
- **Dato de emisión:** medida directa de las emisiones de los gases considerados para el cálculo de la huella de carbono. Se expresa en peso de gas o en volumen de ese gas.
- **Potencial de calentamiento global (GWP- Global warming potential):** Es un factor que describe el aporte al efecto invernadero de cada gas respecto al dióxido de carbono (CO2) que se toma como gas de referencia. Este valor depende de la capacidad de adsorción de radiación infrarroja y de la vida en la atmosfera.

(Callahan et al., 2011) El estándar Scope 3 distingue 13 categorías de emisiones indirectas, pero en esta tesis se consideran las que afectan la fase de diseño y cadena de suministro.

Por lo que sigue en 2018 se publica una nueva versión de la norma ISO 14064 que modifica los alcances mencionados anteriormente y se tienen en cuenta(ISO, 2019), además, los siguientes:

Tabla 2 Categoría de emisiones de GEI norma ISO 14064 de 2018

Categoría de emisiones GEI	
Emisiones directas	Análogo al alcance 1 de GHG Protocol
Emisiones indirectas por energía importada	Análogo al alcance 1 de GHG Protocol
Emisiones indirectas por transporte	Debidas principalmente al consumo de combustible en vehículos para transporte de personas, productos... por todos los medios (carreteras, ferrocarril, vía marítima y aérea). Puede incluir emisiones de fugas de gases refrigerante en los vehículos o de la construcción de estos.

Categoría de emisiones GEI	
Emisiones indirectas por productos y servicios utilizados por la organización	Emisiones de productos comprados (asociados a su fabricación y a sus materias primas), bienes de capital (equipos, maquinaria, vehículos...) y servicios (tratamiento de residuos, limpieza, entrega de correspondencia...)
Emisiones indirectas de otras fuentes	Cualquier otra emisión no incluida en categorías anteriores.

2.3.3 Índice de Desempeño Ambiental - EPI

El **EPI - Environmental Performance Index**, es un índice que clasifica a los países según su desempeño en cuestiones de salud ambiental y vitalidad del ecosistema. En español se conoce como **Índice de Desempeño Ambiental (IDA)** o **Índice de Rendimiento Ambiental**.

El **Índice de Desempeño Ambiental** es una medida utilizada para evaluar el rendimiento o la eficacia de un producto, proceso o sistema en términos de su impacto ambiental. Este índice se calcula considerando una serie de indicadores ambientales clave, como las emisiones de gases de efecto invernadero, el consumo de energía, el uso de recursos naturales y la generación de residuos. El objetivo del Índice de desempeño ambiental es proporcionar una forma cuantitativa de comparar y clasificar el desempeño ambiental relativo de diferentes opciones y facilitar la toma de decisiones más sostenibles.

El informe del EPI de 2022 proporciona un resumen global sobre el estado de la sostenibilidad. Utilizando 40 indicadores en 11 categorías, el índice clasifica a 180 países según su rendimiento en áreas como el cambio climático y la salud ambiental. Estos indicadores evalúan qué tan cerca están los países de alcanzar sus objetivos de políticas ambientales, destacando a los líderes y rezagados en desempeño ambiental y sirviendo como guía práctica para avanzar hacia un futuro sostenible (Environmental Performance Index (EPI) et al., 2022).

El Informe del Índice de Desempeño Ambiental 2022 (EPI 2022) se enfoca en tres metas de política distintas: Salud Ambiental, Vitalidad del Ecosistema y Cambio Climático. Estos

objetivos se evalúan a través de la medición de 40 indicadores específicos distribuidos en 11 categorías temáticas(Socioeconomic Data and Applications Center (Sedac), 2022):

1. **Mitigación del Cambio Climático:** Se refiere a las acciones y políticas implementadas para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y limitar el calentamiento global.
2. **Calidad del aire:** Hace referencia a la evaluación de la contaminación atmosférica y sus efectos en la salud humana y el medio ambiente. Se analizan indicadores como las emisiones de contaminantes y la calidad del aire en áreas urbanas y rurales.
3. **Saneamiento y Agua Potable:** Se centra en la disponibilidad y accesibilidad de servicios de saneamiento adecuados y agua potable segura. Se considera la infraestructura, el tratamiento de aguas residuales y la calidad del agua para el consumo humano.
4. **Metales pesados:** Evalúa la presencia y liberación de metales pesados en el medio ambiente, ya sea naturalmente o como resultado de actividades humanas. Se analizan indicadores relacionados con la contaminación y el impacto en la salud y los ecosistemas.
5. **Gestión de residuos:** Examina las prácticas de gestión de residuos, incluyendo la reducción, reciclaje, tratamiento y disposición final de residuos sólidos y peligrosos. Se evalúan aspectos como la eficiencia de los sistemas de gestión y el impacto ambiental de los residuos generados.
6. **Biodiversidad y Hábitat:** Se centra en la conservación y protección de la biodiversidad y los hábitats naturales. Se evalúa el estado de la biodiversidad, la preservación de los ecosistemas y la protección de especies en peligro de extinción.
7. **Servicios de ecosistema:** Analiza la provisión de servicios y beneficios que los ecosistemas brindan a la sociedad, como la purificación del agua, la polinización de cultivos, el control de inundaciones y la captura de carbono.

8. **Pesca:** Se enfoca en la sostenibilidad de las actividades pesqueras, evaluando la salud de las poblaciones de peces, las prácticas de pesca y el impacto en los ecosistemas acuáticos.
9. **Lluvia ácida:** Analiza la presencia de sustancias ácidas en la atmósfera y su impacto en los ecosistemas terrestres y acuáticos. Se evalúa la emisión de contaminantes y la acidificación de suelos y cuerpos de agua.
10. **Agricultura:** Se refiere a la sostenibilidad y eficiencia de las prácticas agrícolas, incluyendo el uso de fertilizantes, la gestión de pesticidas, la conservación del suelo y la protección de los recursos naturales.
11. **Recursos hídricos:** Evalúa la gestión y disponibilidad de los recursos hídricos, incluyendo el acceso a agua limpia, la eficiencia en el uso del agua, la protección de los cuerpos de agua y la conservación de los ecosistemas acuáticos.

El marco EPI organiza 40 indicadores en 11 categorías de problemas y tres objetivos de política (cambio climático, vitalidad ecosistémica y salud ambiental), con pesos que se muestran en cada nivel como un porcentaje del puntaje total (Szabo et al., 2021), como se muestra en la siguiente figura:

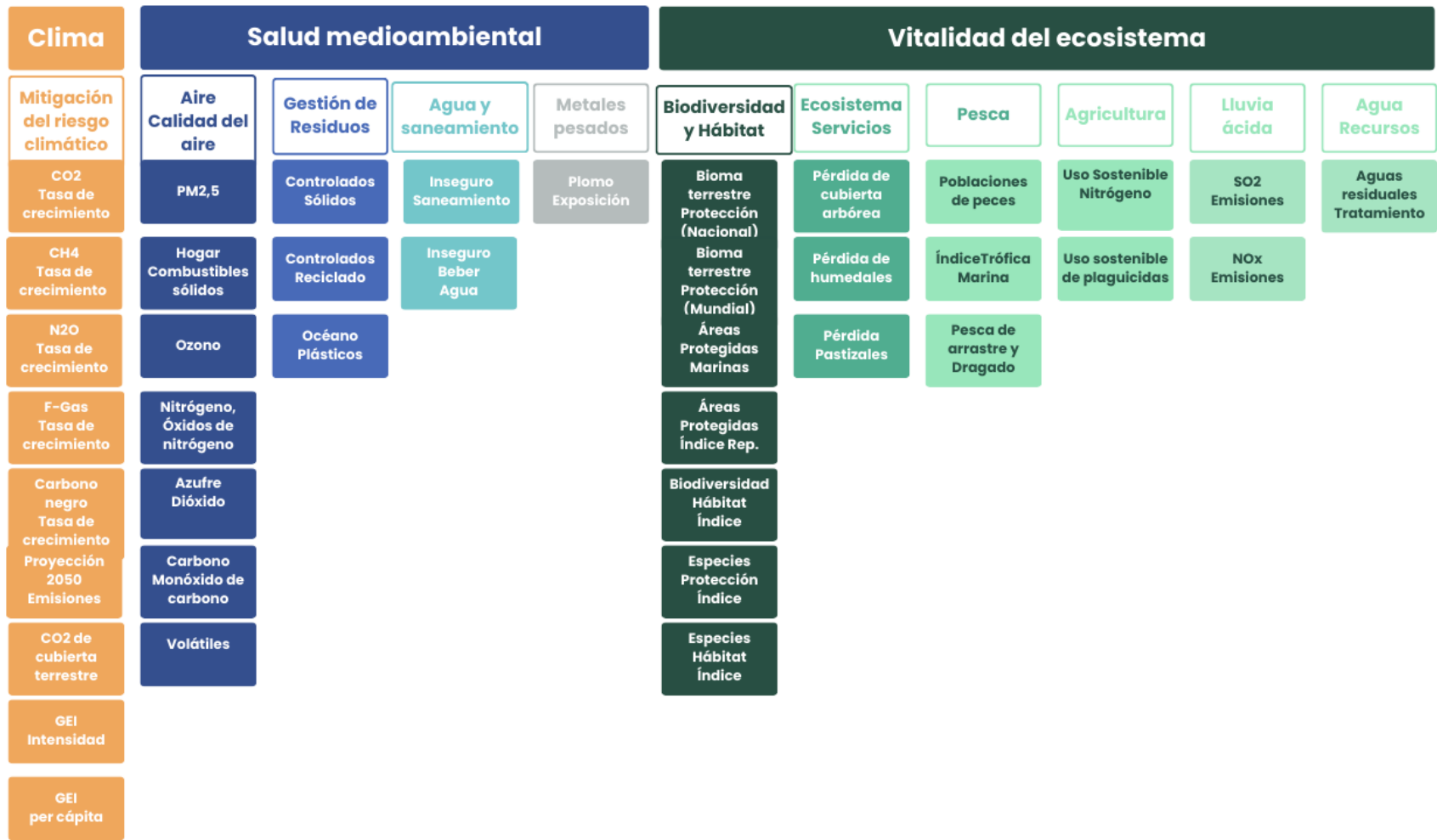


Figura 6 Marco EPI 2022

Tomado de: CT: (Environmental Performance Index (EPI) et al., 2022)

Los avances continuos en el monitoreo ambiental y la presentación de datos han permitido que el EPI 2022 incluya varios indicadores innovadores (Environmental Performance Index (EPI) et al., 2022). El informe respalda los debates sobre las políticas climáticas en constante evolución mediante la incorporación de un nuevo indicador que proyecta el progreso de los países hacia la meta de emisiones netas cero para el año 2050. La métrica de cero emisiones netas en 2050 se convierte en una herramienta que legisladores, medios de comunicación, líderes empresariales y el público en general pueden utilizar para evaluar la efectividad de las políticas nacionales, identificar a los principales contribuyentes al cambio climático y movilizar apoyo para mejorar las trayectorias de emisiones de aquellos países que aún no se encuentran en la dirección correcta.

Es importante tener en cuenta que la selección de los indicadores de desempeño ambiental adecuados dependerá del producto, el sector y los objetivos específicos de la evaluación.

2.3.4 Análisis (o evaluación) del ciclo de vida

El Análisis del Ciclo de Vida (ACV) o Life Cycle Assessment (LCA) es una metodología completa que evalúa los impactos ambientales en cada etapa de la vida de un producto, desde la extracción de materias primas hasta su eliminación final. Este método ayuda a las empresas y consultores a encontrar formas de mejorar la sostenibilidad ambiental de sus productos. La normativa ISO 14040 establece un marco para llevar a cabo estudios de LCA, garantizando la consistencia y calidad de la evaluación (International Organization for Standardization, 2006).

La metodología de Análisis del Ciclo de Vida (ACV) se aplica en tres ámbitos principales, según Baumann y Tillman (2004). En primer lugar, en la toma de decisiones, abarcando el diseño y desarrollo de productos y procesos, las compras, y la información utilizada en la definición de estrategias y leyes ambientales. En segundo lugar, en la investigación y

desarrollo, incluyendo la caracterización de sistemas de producción, la identificación de acciones de mejora, y la selección de indicadores ambientales. En tercer lugar, en el marketing, cubriendo el eco etiquetado y la declaración de productos “ecológicos”. El ACV consta de diversas fases interrelacionadas, como la definición de objetivos y alcance del estudio, el análisis de inventario, la evaluación de impacto, y la interpretación de resultados(Feijoo & Moreira, 2020).Lo anterior, lo podemos evidenciar en la siguiente figura:



Figura 7 Etapas y aplicaciones de la metodología del análisis de ciclo de vida

Tomado de:(Feijoo & Moreira, 2020)

En general, la evaluación del ciclo de vida se reconoce como la herramienta más robusta para analizar los efectos medioambientales del diseño de productos circulares o modificaciones en el sistema (Elia et al., 2017). Los informes de Evaluación del ciclo de vida abarcaron una variedad de productos, incluyendo diversas respuestas dentro del ámbito de la economía circular, tales como el reciclaje, la prolongación de la vida útil de los productos, la reutilización, la refabricación y los sistemas de productos como servicio. Estos estudios proporcionaron enseñanzas valiosas sobre las implicaciones de los cambios circulares en el

diseño y la aplicación de la Evaluación del ciclo de vida. Numerosas investigaciones se centraron en los resultados finales del uso de una amplia gama de productos, abarcando diversos aspectos: reciclaje fotovoltaico, reutilización de fibra textil, madera contrachapada reciclaje y reciclaje o reutilización de botellas de vino(Harris et al., 2021).

Es de gran relevancia conocer el desempeño ambiental de un producto ya que esto puede afectar significativamente la sostenibilidad de una empresa y la calidad de vida de las personas en la sociedad. Por esta razón, es esencial que las empresas consideren el impacto ambiental de sus productos y trabajen para reducir su huella ambiental.

2.4 Síntesis de revisión de la literatura

En el **Anexo A. Reporte de revisión de literatura sobre métodos y herramientas para la evaluación del desempeño ambiental**, se muestra los resultados en la **Tabla 9** donde se indican el título del documento, autor, año, objetivo, metodología, tema y principales hallazgos en cada uno de los documentos seleccionados:

La tabla presenta un análisis de varios aspectos relacionados con la sostenibilidad ambiental y el diseño de productos. Se destaca el **Índice de Desempeño Ambiental (EPI)** de 2022, que proporciona un resumen basado en datos del estado de la sostenibilidad en todo el mundo (Majerník et al., 2023). El EPI organiza 40 indicadores en 11 categorías de temas y tres objetivos de políticas. Los pilares principales del índice son el desempeño en materia de cambio climático, salud ambiental y vitalidad de los ecosistemas.

La tabla también se menciona un estudio exhaustivo de la literatura durante los últimos cuatro años, donde se analizan tendencias y se identifican los factores clave que pueden afectar la sostenibilidad ambiental en el proceso de diseño de productos(Departamento de Desarrollo Económico, 2023). Los factores con un potencial significativo para mejorar la sostenibilidad ambiental incluyen los “6Rs” (Reducir, Reutilizar, Reciclar, Rediseñar,

Remanufacturar, Recuperar), la gestión de residuos y energía, y las consideraciones sobre el ciclo de vida del producto (Delaney et al., 2022).

Además, se propone un marco conceptual para ayudar a los diseñadores a implementar la sostenibilidad ambiental durante el desarrollo de productos. Se destaca la importancia de considerar el impacto ambiental en todas las etapas del proceso de diseño. Asimismo, se menciona el Análisis de Ciclo de Vida (ACV), que permite la identificación de los principales elementos precisos para evaluar el desempeño ambiental (Marco Para El Establecimiento de Requisitos de Diseño Ecológico Aplicables a Los Productos Sostenibles y Se Deroga La Directiva 2009/125/CE, 2022). También, se enfatiza la importancia de abordar las implicaciones sociales y económicas junto con los aspectos ambientales (Wang et al., 2021).

El análisis integra los elementos clave de sostenibilidad en el diseño de productos y orienta futuras investigaciones. A la par, la divulgación del desempeño ambiental se consolida como estándar de mercado—impulsada por el Pacto Verde y por la demanda de mayor compromiso y transparencia—ganando relevancia para inversionistas y clientes.

El 13 de diciembre de 2022 concluyó el plazo para comentarios públicos sobre la modificación del Real Decreto 163/2014, que regula el registro de huella de carbono. La nueva normativa obligará a las empresas con más de 250 empleados y grandes balances o ventas, según la Ley 11/2018, a calcular su huella de carbono desde 2025 y crear planes de reducción. Además, introducirá gradualmente el cálculo del alcance 3 para grandes empresas, siendo opcional para las pymes (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico & Gobierno de España, 2023).

La integración de la evaluación del desempeño ambiental en el desarrollo de productos permite gestionar a la vez impactos y creación de valor. Se evaluará el perfil ambiental del sistema de producto a lo largo de su ciclo de vida en relación con su valor, definiendo con precisión objetivo y alcance (sistema, funciones, límites y métodos). Se seleccionarán

indicadores que reflejen mejora ambiental y de valor, orientando un desarrollo sostenible al optimizar el rendimiento y minimizar el impacto.(Majerník et al., 2023)

Para empezar a medir mejor el rendimiento ambiental de los productos se aborda mediante la implementación de un pasaporte digital de producto, tal como lo propone el Reglamento de ecodiseño para productos sostenibles (Comisión Europea,2022). Este pasaporte contendrá datos ambientales importantes, con el objetivo de ayudar tanto a consumidores privados como públicos a tomar decisiones conscientes sobre la sustitución o reducción en el uso de materiales, fomentando productos con más contenido reciclado, uso más eficiente, mayor durabilidad y conservación del valor de los productos y materiales para facilitar su reutilización, reparación y reciclaje. La iniciativa comenzó con las baterías, ofreciendo un registro electrónico que detalla su rendimiento y durabilidad (Comisión Europea, 2020). Se espera expandir el uso del pasaporte digital a sectores como la electrónica, mobiliario, TIC, textiles, y materiales de alto impacto como acero, cemento y productos químicos, siguiendo el Plan de Acción de Economía Circular europeo.

El enfoque de ciclo de vida en el diseño de productos y servicios es esencial para promover la economía circular, destacado por la iniciativa europea de productos sostenibles. La revisión de la Directiva de Ecodiseño(Marco Para El Establecimiento de Requisitos de Diseño Ecológico Aplicables a Los Productos Sostenibles y Se Deroga La Directiva 2009/125/CE, 2022), amplía su alcance a productos como el acero o el cemento e incluye criterios para mejorar la circularidad, como la durabilidad y la reciclabilidad, además de introducir el pasaporte digital de producto.

De la mano con lo anterior el JRC de la Comisión Europea propone prioridades de productos y medidas horizontales para el futuro Reglamento de diseño ecológico de productos sostenibles. Identifica 19 productos prioritarios (12 de uso final y 7 intermedios) seleccionados por criterios alineados con los objetivos climáticos, ambientales y energéticos de la UE. La selección se basa en 10 categorías de impacto ;como consumo de energía y

eficiencia de materiales. Cubriendo todo el ciclo de vida, mostradas a continuación:

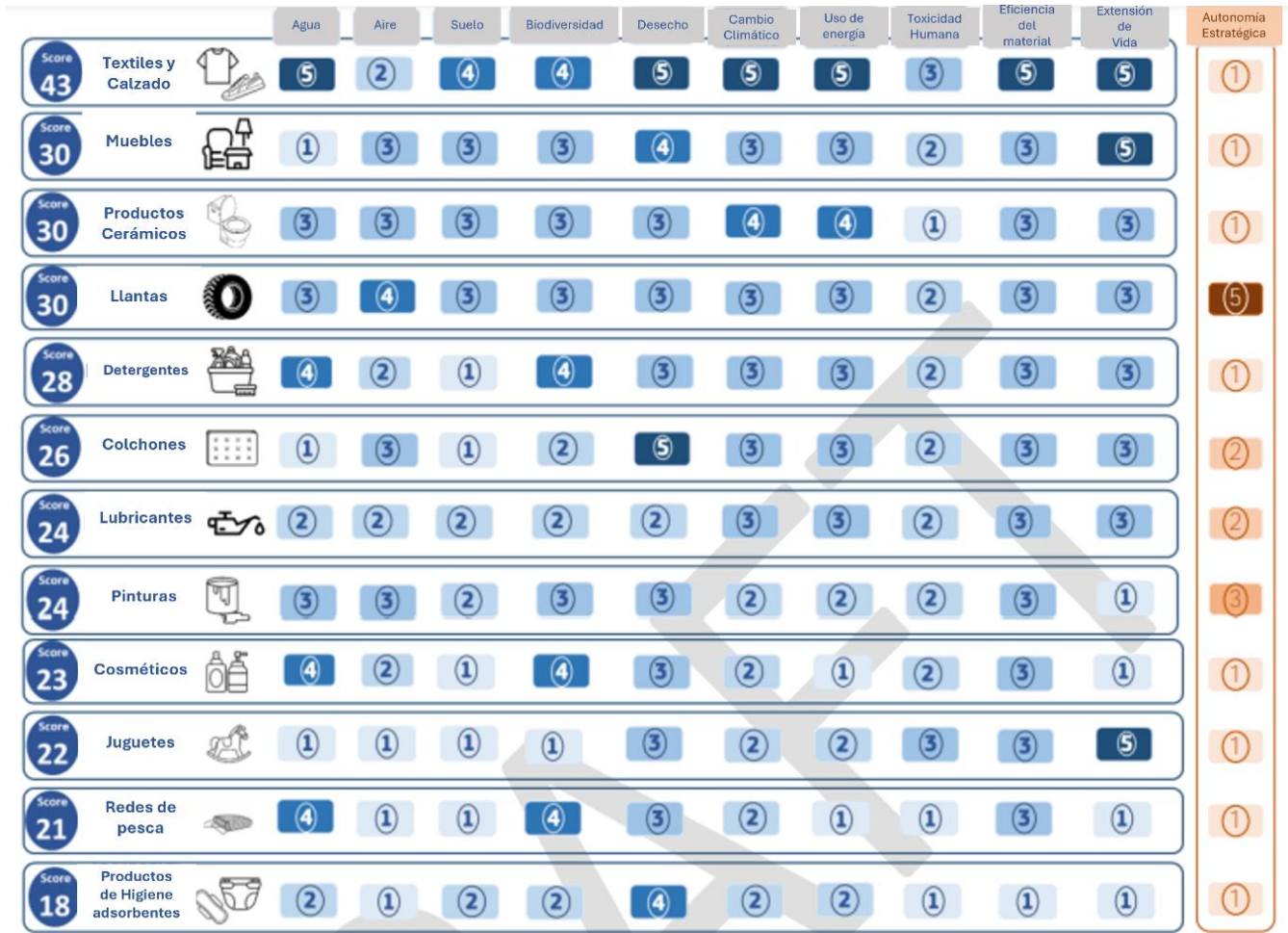


Figura 8- Los 12 productos finales preseleccionados. Tomado de (Palma et al., 2023)

El estudio identificó grupos de productos con alto potencial de mejora ambiental bajo la normativa de diseño ecológico, como muebles, productos cerámicos y neumáticos, destacando oportunidades en durabilidad, eficiencia energética y reciclaje. Además, se señalaron aspectos clave para detergentes y colchones, enfocándose en sostenibilidad de materiales y prácticas de reciclaje. Estos hallazgos subrayan la importancia de adaptar estrategias de diseño ecológico al mercado y a los impactos globales, señalando una dirección para futuras acciones regulatorias y prácticas de producción sostenible.

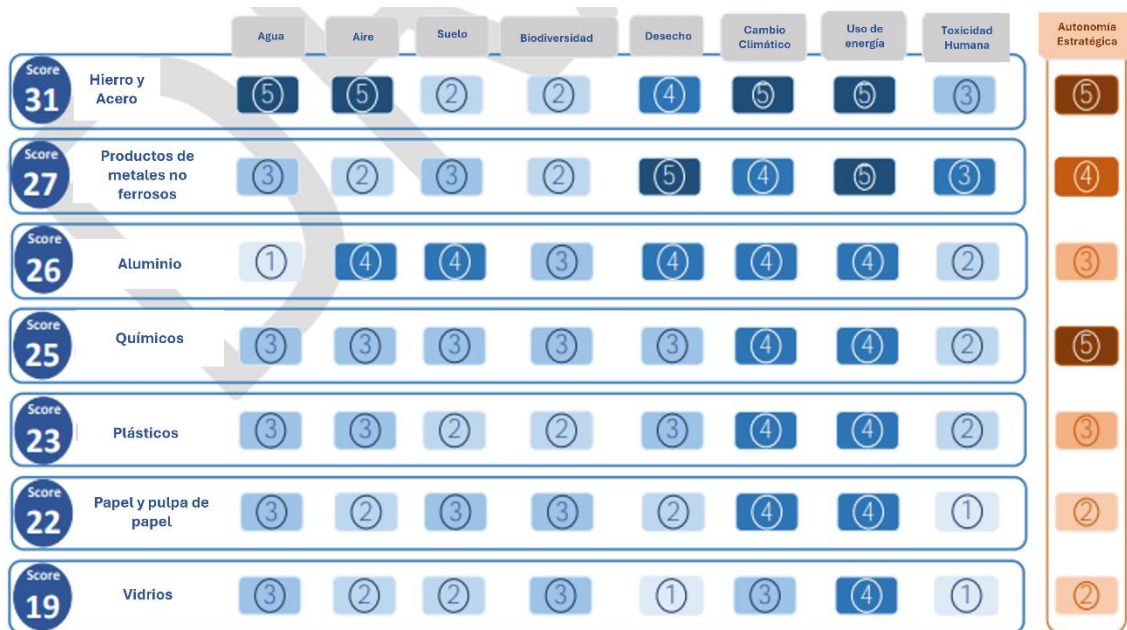


Figura 9 Los 7 productos intermedios preseleccionado. Tomado de (Palma et al., 2023)

Los metales no ferrosos presentan altos impactos en residuos y energía; la prioridad es aumentar la circularidad para reducir minería y contaminación. El aluminio destaca por su huella climática y energética, por lo que se propone bajar emisiones y elevar el contenido reciclado. Químicos y plásticos también ofrecen amplio potencial de mejora mediante eficiencia, innovación y materias primas más sostenibles. Como caso aplicado, MADASTER es una plataforma europea de construcción circular que genera pasaportes de materiales por activo, entrega índice de circularidad, información de CO₂ almacenado y registro público, útil para gestión integral y demolición selectiva. (Departamento de Desarrollo Económico, 2023).

Del mismo modo, las empresas enfrentan la presión de cumplir con legislaciones de descarbonización, así como también con las exigencias del mercado, que promueven la acción climática. Sectores como la automoción y la construcción se suman a iniciativas de neutralidad climática y valoran la reputación y transparencia ambiental. Destacan programas como la Science Based Targets Initiative, pero existen otras como Climate Action 100+, We Mean Business Coalition, o Green Consumption Pledge., además de herramientas

como EcoVadis, que evalúan el compromiso climático empresarial (Departamento de Desarrollo Económico, 2023).

La SBTi ofrece un marco con verificación independiente para que las empresas fijen metas de reducción de GEI alineadas con 1,5 °C y la neutralidad climática a 2050, abarcando también la cadena de suministro. Lanzó el primer estándar global de net-zero corporativo, y publica guías específicas (p. ej., financiero y uso intensivo de la tierra), además de desarrollar metodologías para otros sectores críticos. (Science Based Targets, 2020).

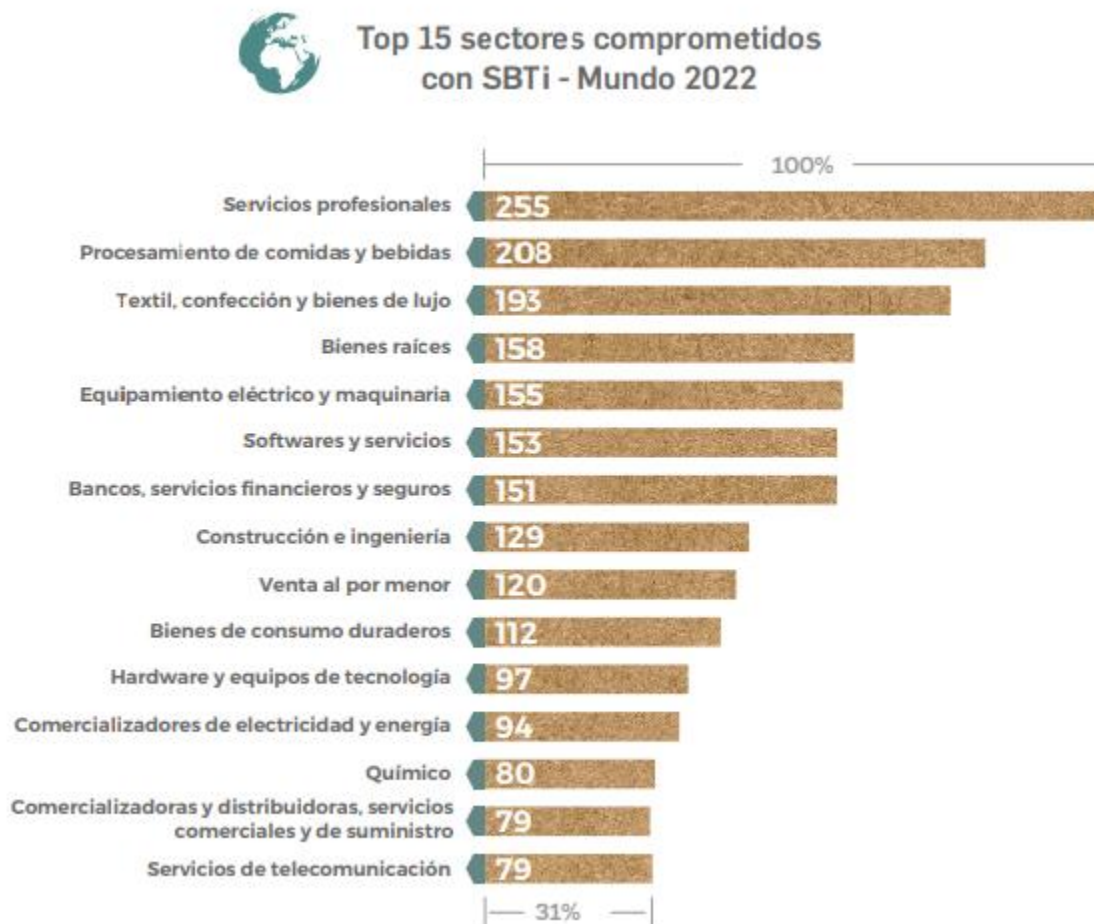


Figura 10 Top 15 sectores comprometidos con SBTi en el mundo. Tomado de (Pacto Mundial Red Española & ECODES, 2022)

La adopción de SBTi por sector depende de la estructura empresarial, la diversidad sectorial, la complejidad para fijar metas, la disponibilidad de metodologías y la presión regulatoria/competitiva. A nivel global, los Servicios Profesionales (p. ej., consultoría corporativa) figuran entre los más comprometidos, lo que sugiere usarlos como punto de partida para integrar desempeño ambiental y desarrollo de producto.

EcoVadis impulsa prácticas ambientales y sociales más responsables mediante una plataforma colaborativa que evalúa la sostenibilidad de las empresas con puntajes de 0 a 100 y medallas (bronce, plata, oro), basadas en la integración de la RSC en sus operaciones. Aunque no audita directamente, combina autoevaluaciones de proveedores con su análisis para detectar fortalezas y oportunidades de mejora en sectores clave. (Ecovadis SAS, 2022). En 2021, EcoVadis introdujo un Módulo de acción sobre el carbono para facilitar a las empresas la recopilación y análisis de datos sobre emisiones de sus cadenas de suministro. Esto culminó en el lanzamiento del informe "Carbon Maturity Report 2022", destacando avances en la acción climática dentro de la Red de EcoVadis(Departamento de Desarrollo Económico, 2023).

3 HERRAMIENTA DE ANÁLISIS PARA LA SELECCIÓN DE MÉTODOS DE EVALUACIÓN Y MEDICIÓN DEL DESEMPEÑO AMBIENTAL DE UN PRODUCTO

Este capítulo da cumplimiento al Objetivo específico 2: a partir del entendimiento de las fases del ciclo de vida y de los enfoques de evaluación previamente establecidos, se construye una herramienta de análisis que permite seleccionar métodos de evaluación y medición del desempeño ambiental acordes al contexto empresarial. El capítulo presenta la metodología definición y jerarquización de criterios, construcción de matrices de evaluación, asignación de preferencias y verificación de consistencia y los resultados logrados, que incluyen la priorización de métodos y lineamientos de aplicación para apoyar decisiones en consultoría corporativa. En consecuencia, se propone caracterizar los diferentes métodos mediante tres herramientas de priorización, los cuales se describen a continuación:

1. **Matriz de clasificación (conveniencia por ámbito de evaluación).** Se construirá una matriz que indique qué métodos son más convenientes según el ámbito de evaluación: bienes manufacturados, servicios, organizaciones y procesos/sistemas. La matriz contrasta el enfoque de cada método de desempeño ambiental y su idoneidad por ámbito, entregando una primera lectura de ajuste método-contexto.
2. **Matriz de calificación (robustez, relevancia y pertinencia).** Se elaborará una matriz de calificación (desarrollada por el autor) que puntúe la robustez de cada método considerando su uso por ámbito (bienes, servicios, organizaciones, procesos), así como su relevancia (en relación con los impactos y categorías prioritarias) y pertinencia (ajuste al contexto empresarial y a las decisiones de consultoría). El resultado será un ranking comparativo con justificación.
3. **Guía de evaluación ambiental combinando LCA y MCA.** Se propone una guía metodológica para la herramienta que integra Análisis de Ciclo de Vida (LCA) con

Análisis Multicriterio (MCA), utilizando AHP como técnica de ponderación. La lógica parte de indicadores y datos ambientales para extender su alcance a lo largo del ciclo de vida, luego, se agrega esos resultados en un índice único mediante MCA/AHP para soportar decisiones empresariales. Este enfoque sigue la combinación COMPLIMENT que articula EPIs, LCA y MCA y documenta el paso de ponderación/agrupación con AHP para obtener prioridades comparables entre alternativas(Hermann et al., 2007).

- i) La guía plantea dos jerarquías paralelas:
 - a) Una que otorga mayor peso a los impactos ambientales.
 - b) Otra que otorga mayor peso al contexto empresarial.

La estructura jerárquica de AHP permite modelar estas prioridades, gestionar pesos locales y globales y explorar escenarios con diferentes ponderaciones según los objetivos de la organización y la participación de expertos(Szabo et al., 2021).

- ii) Se describirá el procedimiento (definición de criterios, pesos, comparación por pares y priorización) y se realizará un análisis de sensibilidad para ambos escenarios.

3.1 Matriz de clasificación de métodos por ámbito de evaluación (bienes/servicios, organizaciones y procesos)

Se realiza la matriz de clasificación de métodos donde se aplique en productos, servicios, organizaciones y procesos y/o sistemas y se incluyen métodos como el basado en la huella de carbono, el análisis de energía/exergía, y el impacto ambiental. Esta matriz permitirá visualizar la aplicabilidad y el enfoque específico de cada método en diferentes contextos, facilitando así la priorización y selección adecuada para cada caso particular mostrada a continuación:

Tabla 3 Matriz de clasificación de aplicabilidad empresarial vs enfoque. Elaboración propia

	Métodos basados en la Huella	Análisis de energía/exergía	Impacto ambiental
Productos	Product environmental Footprint - PEF		Environmental Product Index - EPI
	- Huella hídrica del producto		Evaluación de Impacto Ambiental (EIA)
	PAS 2050 (Huella de carbono)		Eco-indicator 99 y ReCiPe
	- Huella de materiales		EIO-LCA (Economic Input-Output Life Cycle Assessment)
	- Huella ecológica		Eco diseño (diseño sostenible)
	- Huella de carbono del ciclo de vida		Innovación verde (eco-innovación)
	Life Cycle Assessment - LCA		Life Cycle Assessment - LCA
	GHG Protocol Product Standard		Enfoque SPDS (Sustainable Product Development and Service)
	Environmental Product Index - EPI		
Science Based Targets initiative (SBTi)			
Servicios	Life Cycle Assessment - LCA		Life Cycle Assessment - LCA
	Environmental Product Index - EPI	EnergyPlus	Evaluación de Impacto Ambiental (EIA)
	Science Based Targets initiative (SBTi)		EIO-LCA (Economic Input-Output Life Cycle Assessment)
			Eco diseño (diseño sostenible)
			Innovación verde (eco-innovación)
			Gestión de abastecimiento Verde (Green Supply Chain Management, GSCM)
			Enfoque SPDS (Sustainable Product Development and Service)
		Environmental Product Index - EPI	
Organizaciones	Organisation environmental Footprint - OEF	Análisis de eficiencia ambiental	
	Life Cycle Assessment - LCA	RETScreen	Life Cycle Assessment - LCA
	PAS 2050 (Huella de carbono)	EnergyPlus	Evaluación de Impacto Ambiental (EIA)

	Métodos basados en la Huella	Análisis de energía/exergía	Impacto ambiental
	GHG Protocol Product Standard	EES (Engineering Equation Solver)	Evaluación de Impacto Ambiental Estratégica (SEA)
	Environmental Product Index - EPI		Eco-indicador 99 y ReCiPe
	Science Based Targets initiative (SBTi)		EIO-LCA (Economic Input-Output Life Cycle Assessment)
			Eco diseño (diseño sostenible)
			Innovación verde (eco-innovación)
			Gestión de abastecimiento Verde (Green Supply Chain Management, GSCM)
			Enfoque SPDS (Sustainable Product Development and Service)
			Sistema EMAS (Eco-Management and Audit Scheme)
			Gestión de riesgos
			Auditoría ambiental
			Environmental Product Index - EPI
Procesos/Sistemas	Environmental Product Index - EPI	Análisis de eficiencia ambiental	Environmental Product Index - EPI
		RETScreen	Life Cycle Assessment - LCA
		EnergyPlus	Evaluación de Impacto Ambiental (EIA)
		EES (Engineering Equation Solver)	Eco diseño (diseño sostenible)
			Enfoque SPDS (Sustainable Product Development and Service)
			Sistema EMAS (Eco-Management and Audit Scheme)
			Gestión de riesgos
			Auditoría ambiental
			Environmental Product Index - EPI

De la tabla comparativa, y a la luz de la síntesis de literatura del capítulo anterior, se evidencia un predominio y redundancia de métodos de desempeño ambiental orientados a bienes manufacturados. La mayoría comparte fundamentos en los siguientes métodos:

- Análisis de ciclo de vida (ACV)
- Índice de productos ambientales (EPI)
- PAS 2050

Por lo tanto, se podrán tener en cuenta en el ejercicio para priorizar los diferentes métodos de desempeño ambiental para la herramienta de análisis de selección que se abordará más adelante.

3.2 Matriz de evaluación aplicación, relevancia y pertinencia del Método de desempeño ambiental.

Continuando con el ejercicio de priorización, se propone la estructuración de una matriz calificadora que contemple los métodos de desempeño ambiental identificados en la revisión literaria. Esta matriz incluirá una descripción general de cada método, su aplicabilidad, relevancia, pertinencia y su clasificación como método, guía y/o herramienta. La elaboración de esta matriz se basó en la experticia y en la búsqueda de fuentes secundarias y primarias realizadas en los capítulos previos, con el objetivo de facilitar la priorización de los diferentes métodos de desempeño ambiental. A continuación, se muestra la matriz:

Tabla 4 Matriz de evaluación aplicación, relevancia y pertinencia del Método de desempeño ambiental. Elaboración propia.

Método	Descripción	Producto	servicio	Organizaciones	Proceso	Relevancia	Pertinencia	Total	Clasificación
Huella ambiental del producto - PEF	Mide la huella de carbono de productos	1	0	0	0	1	0	2	Método
Índice de productos ambientales - EPI	Proporciona un resumen basado en datos del estado de la sostenibilidad en todo el mundo	1	1	1	1	1	1	6	Guía
Análisis de Ciclo de Vida (LCA)	Evalúa los impactos ambientales de un producto a lo largo de su vida útil	1	1	1	1	1	1	6	Método
Análisis de eficiencia ambiental	Enfoque sistemático para evaluar y mejorar la eficiencia con la que una organización utiliza recursos naturales y gestiona sus impactos ambientales.	1	1	1	1	1	1	6	Método
Evaluación de Impacto Ambiental (EIA)	Analiza los impactos ambientales de productos, servicios y actividades organizacionales	1	1	1	1	1	1	6	Método
Evaluación de Impacto Ambiental Estratégica (SEA)	Asegura la protección ambiental en políticas y planes organizacionales.	0	0	1	0	1	1	3	Método
Gestión de riesgos	Cuantifica la probabilidad de impactos negativos en el medio ambiente.	0	0	1	1	0	1	3	Método
Auditoría ambiental	Evalúa el desempeño ambiental actual y establece metas futuras.	0	0	1	1	1	1	4	Herramienta
PAS 2050 (Huella de carbono)	Especificación para evaluar la huella de carbono de productos	1	0	1	1	1	1	5	Guía
GHG Protocol Product Standard	Marco para cuantificar y reportar las emisiones de GEI de productos	1	0	1	0	1	1	4	Herramienta
Eco-indicator 99 y ReCiPe	Métodos de evaluación de impacto ambiental en productos.	1	0	1	0	0	1	3	Herramienta
EIO-LCA (Economic Input-Output Análisis de Ciclo de Vida)	Evalúa el impacto macroeconómico de productos y servicios	1	1	1	0	0	1	4	Herramienta
RETScreen	Analiza la viabilidad de proyectos de energía limpia y eficiencia energética	0	1	1	1	0	1	4	Herramienta
EnergyPlus	Simula el uso de energía en edificios y sistemas HVAC	0	1	1	1	0	1	4	Herramienta
EES (Engineering Equation Solver)	Realiza cálculos de exergía y eficiencia energética en sistemas.	0	0	1	1	0	1	3	Herramienta

Método	Descripción	Producto	servicio	Organizaciones	Proceso	Relevancia	Pertinencia	Total	Clasificación
Ecodiseño (diseño sostenible)	integración de consideraciones ambientales en el proceso de diseño de productos. El objetivo del ecodiseño es minimizar los impactos ambientales negativos a lo largo del ciclo de vida de un producto	1	1	1	0	1	1	5	Guía
Innovación verde (eco-innovación)	Desarrollo de nuevos productos, servicios, procesos, tecnologías y modelos de negocio que reducen el impacto ambiental y promueven la sostenibilidad.	1	1	1	1	1	1	6	Guía
Gestión de abastecimiento Verde ((Green Supply Chain Management, GSCM)) (compras sostenibles)	Integrar consideraciones ambientales y de sostenibilidad en el proceso de adquisición de bienes y servicios. Su objetivo es reducir el impacto ambiental a lo largo de la cadena de suministro y fomentar prácticas responsables entre los proveedores	0	1	1	0	1	1	4	Método
Enfoque SPDS (Sustainable Product Development and Service)	Marco integral que se enfoca en la sostenibilidad en el desarrollo de productos y servicios. Este enfoque busca integrar consideraciones ambientales, económicas y sociales en todas las etapas del ciclo de vida de un producto o servicio, desde el diseño hasta su disposición final	1	1	1	1	0	1	5	Método
Sistema EMAS (Eco-Management and Audit Scheme)	Esquema voluntario diseñado para mejorar el desempeño ambiental de las organizaciones mediante la implementación de un sistema de gestión ambiental, la realización de auditorías internas y externas, y la comunicación transparente de los resultados ambientales.	0	0	1	1	1	1	4	Método
Science Based Targets initiative (SBTi)	Guía que proporciona directrices para establecer objetivos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) basados en la ciencia. Su objetivo es alinear las metas de las organizaciones con los objetivos del Acuerdo de París y contribuir a la mitigación del cambio climático	1	1	1	0	1	1	5	Guía

De la tabla anterior, y teniendo en cuenta principalmente su puntaje total calificado según criterio propio y su clasificación como guía y/o método de desempeño ambiental, se priorizan los siguientes:

- Análisis de ciclo de vida (ACV)
- Índice de productos ambientales - EPI
- Análisis de eficiencia ambiental
- Evaluación de Impacto Ambiental (EIA)
- PAS 2050 (Huella de carbono)
- Enfoque SPDS (Sustainable Product Development and Service)

Con todo lo anterior y basado en el análisis de las dos matrices realizadas anteriormente, se define el método que se tendrán en cuenta para la estructuración de la herramienta de análisis para la selección de alternativas de evaluación y medición del desempeño ambiental de un producto en el siguiente capítulo. Los métodos priorizados son los siguiente:

Método de desempeño ambiental seleccionado

Análisis de ciclo de vida (ACV)

Por lo tanto, se establece la necesidad de herramientas analíticas específicas para facilitar la evaluación del desempeño ambiental de productos, introduciendo los objetivos y la estructura del capítulo.

3.3 Guía integrada LCA–MCA (AHP) para la selección de métodos en contextos empresariales.

Para empezar a estructurar la herramienta y seleccionar el método de desempeño ambiental apropiado para el desarrollo de productos, primero se deben generar algunos criterios base que ayudarán en la evaluación y priorización del método a seleccionar y mejor ruta de evaluación del desempeño ambiental. Además, es necesario establecer subcriterios que consideren la mayor parte de los elementos dentro del desarrollo del producto y que, al mismo tiempo, tengan en cuenta los impactos ambientales asociados a cada producto a desarrollar. Es por lo anterior, que teniendo en cuenta la investigación realizada en el capítulo CARACTERIZACIÓN DE MÉTODOS E INDICADORES PARA LA EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO AMBIENTAL DE PRODUCTOS, se llegó a los siguientes criterios:

1. **Impactos Ambientales Directos:** Este criterio se enfoca en evaluar los efectos inmediatos y tangibles que el producto tiene sobre el medio ambiente. Incluye la medición de emisiones de gases de efecto invernadero, consumo de recursos naturales, generación de residuos y otros impactos ambientales directos que se deben tener en cuenta en ciclo de vida de producto (Damiani et al., 2022). Es fundamental para asegurar que el método seleccionado contribuya efectivamente a minimizar el impacto ambiental.
2. **Contexto Empresarial:** Este criterio considera la alineación del método de desempeño ambiental con las características y necesidades específicas de la empresa. Evalúa cómo el método se integra con la estrategia corporativa, los datos disponibles, el sector y su nivel de avance tecnológico (Pacto Mundial Red Española & ECODES, 2022). Es crucial para garantizar que el método sea práctico y aplicable dentro del entorno empresarial específico.
3. **Eficiencia y Efectividad:** Este criterio mide la capacidad del método para proporcionar resultados precisos y útiles de manera eficiente. Incluye la evaluación de la relación costo-beneficio, el tiempo requerido para implementar el método, la facilidad de uso y la fiabilidad de los resultados obtenidos. La eficiencia y efectividad son esenciales para asegurar que el método seleccionado no solo sea viable, sino también sostenible a largo plazo.
4. **Normativa y Compatibilidad:** Este criterio se centra en la conformidad del método con las regulaciones ambientales locales, nacionales e internacionales, así como su compatibilidad con otros sistemas y herramientas utilizados en la empresa. Asegura que el método de desempeño ambiental cumpla con las normativas vigentes y pueda integrarse sin problemas con las prácticas y tecnologías existentes, facilitando su implementación y aceptación.

Continuando con lo anterior, es esencial asignar subcriterios a cada uno de los criterios para poder considerar variables importantes en la evaluación del método de desempeño ambiental. Esto permitirá una mayor especificidad y precisión en la valoración de cada método.

3.3.1 Criterios de segundo nivel para el análisis para la selección de método de método de evaluación y medición del desempeño ambiental de un producto

En el contexto del desarrollo de nuevos productos en consultoría corporativa, la evaluación y medición del desempeño ambiental es crucial para garantizar la sostenibilidad y cumplimiento normativo. Los criterios de segundo nivel permiten una evaluación más detallada y específica de los métodos disponibles, considerando diversas variables relevantes. Estos criterios han sido definidos para maximizar los beneficios ambientales y empresariales, y minimizar los impactos negativos, basándose en la revisión

literaria realizada en capítulos anteriores. Cada subcriterio ha sido cuidadosamente seleccionado teniendo en cuenta la revisión literaria e investigación realizada en este trabajo y justificado en términos de su impacto directo, contexto empresarial, eficiencia y efectividad, así como normativa y compatibilidad, tomando en cuenta sus respectivas unidades de medición. A continuación, se detallan los subcriterios correspondientes:

1. **Impactos Ambientales Directos**(Socioeconomic Data and Applications Center (sedac), 2022):
 - a) **Minimizar Cambio Climático:** Evaluado por la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (en toneladas de CO₂e).
 - b) **Minimizar Consumo de Agua:** Evaluado por la reducción en el uso de agua en los procesos (en m³).
 - c) **Minimizar Agotamiento de la Capa de Ozono:** Evaluado por la reducción de sustancias que agotan la capa de ozono (en toneladas de CFC-11e).
 - d) **Minimizar Toxicidad Humana, Efectos Cancerígenos:** Evaluado por la reducción de sustancias cancerígenas (en mg/m³).
 - e) **Minimizar Toxicidad Humana, Efectos No Cancerígenos:** Evaluado por la reducción de sustancias tóxicas no cancerígenas (en mg/m³).
 - f) **Minimizar Partículas:** Evaluado por la reducción de emisiones de partículas en suspensión (en toneladas).
 - g) **Minimizar Radiaciones Ionizantes, Salud Humana:** Evaluado por la reducción de exposición a radiaciones ionizantes (en Sieverts).
 - h) **Minimizar Formación Fotoquímica de Ozono, Salud Humana:** Evaluado por la reducción de emisiones de precursores de ozono troposférico (en toneladas de VOCs).
 - i) **Minimizar Acidificación:** Evaluado por la reducción de emisiones de gases que causan acidificación (en toneladas de SO₂ y NO_x).
 - j) **Minimizar Eutrofización, Terrestre:** Evaluado por la reducción de nutrientes que causan eutrofización en suelos (en mg/kg).

- k) **Minimizar Eutrofización, Agua Dulce:** Evaluado por la reducción de nutrientes que causan eutrofización en cuerpos de agua dulce (en mg/L).
- l) **Minimizar Eutrofización, Marina:** Evaluado por la reducción de nutrientes que causan eutrofización en ecosistemas marinos (en mg/L).
- m) **Minimizar Ecotoxicidad, Agua Dulce:** Evaluado por la reducción de contaminantes tóxicos en cuerpos de agua dulce (en mg/L).
- n) **Minimizar Uso de la Tierra:** Evaluado por la reducción en el uso de tierra para la producción (en hectáreas).
- o) **Minimizar Uso de los Recursos (Minerales y Metales):** Evaluado por la reducción en el uso de minerales y metales en los productos (en toneladas).
- p) **Minimizar Uso de los Recursos Fósiles:** Evaluado por la reducción en el uso de combustibles fósiles (en toneladas).

2. Contexto Empresarial:

- a) **Maximizar Sector:** Evaluado por la adaptabilidad del método a diferentes sectores industriales (cualitativo).
- b) **Maximizar Disponibilidad de Datos Ambientales:** Evaluado por la facilidad de acceso a datos ambientales necesarios para el método (cualitativo).
- c) **Maximizar Aplicabilidad en la Fase de Diseño de Producto (TRL):** Evaluado por el nivel de madurez tecnológica (TRL) y/o nivel de la tecnología (de 1 a 9).

3. Eficiencia y Efectividad:

- a) **Maximizar Precisión:** Evaluado por la exactitud y fiabilidad de los datos generados por el método (cualitativo).
- b) **Maximizar Relevancia en Impactos:** Evaluado por la capacidad del método para identificar y mitigar impactos ambientales significativos (cualitativo).
- c) **Maximizar Facilidad de Uso:** Evaluado por la facilidad de comprensión y uso del método por parte de los usuarios (cualitativo).

- d) **Minimizar Costo:** Evaluado por el costo asociado a la implementación y operación del método (en millones de pesos).
- e) **Maximizar Alcance:** Evaluado por la cobertura y aplicabilidad del método en diferentes sectores y productos (cualitativo).
- f) **Minimizar Tiempo:** Evaluado por el tiempo requerido para implementar y obtener resultados con el método (en meses).

4. Normativa y Compatibilidad:

- a) **Maximizar Aplicación Colombiana:** Evaluado por la alineación del método con las regulaciones y políticas ambientales específicas de Colombia (cualitativo).
- b) **Maximizar Compatibilidad con Normas y Regulaciones:** Evaluado por el grado de cumplimiento del método con estándares internacionales y locales (cualitativo).
- c) **Minimizar Complejidad:** Evaluado por el nivel de dificultad en la implementación y operación del método (cualitativo).

3.4 Metodología para el diseño de la herramienta LCA–MCA (AHP) para la selección de métodos en contextos empresariales

Cualquier herramienta de medición para una evaluación por parte de expertos, debe contener tres componentes: un conjunto de alternativas que serán comparadas por ellos, criterios cualitativos o cuantitativos que servirán como referencia para que cada experto emita sus juicios sobre el análisis, y finalmente, el objetivo del resultado, es decir, el propósito. (Mendoza et al., 2019).

Es por lo anterior, que es crucial abordar el problema de criterios múltiples con diversas valoraciones. Por este motivo, el Proceso Analítico Jerárquico (Analytic Hierarchy Process o AHP) es una técnica apropiada para las necesidades del problema y puede aplicarse en cinco pasos sistemáticos (SMITH et al., 2000):

1. Desarrollo de la estructura jerárquica.
2. Representación de los juicios de valor.
3. Construcción de las matrices de juicio de valor y matrices normalizadas.
4. Cálculo de los vectores de prioridad y consistencia.
5. Análisis de resultados.

La estructura jerárquica se utiliza para representar el problema de manera gráfica, organizándolo en forma de jerarquía. En esta estructura, el objetivo se sitúa en la parte superior, las alternativas se encuentran en el nivel inferior, y los criterios están ubicados en los niveles intermedios. Dada la ambigüedad de los criterios seleccionados, es inviable priorizar las alternativas basándose solo en estos criterios sin contar con una herramienta que permita realizar juicios subjetivos y, simultáneamente, disminuya la incertidumbre. A continuación, se representa de forma gráfica lo dicho anteriormente:

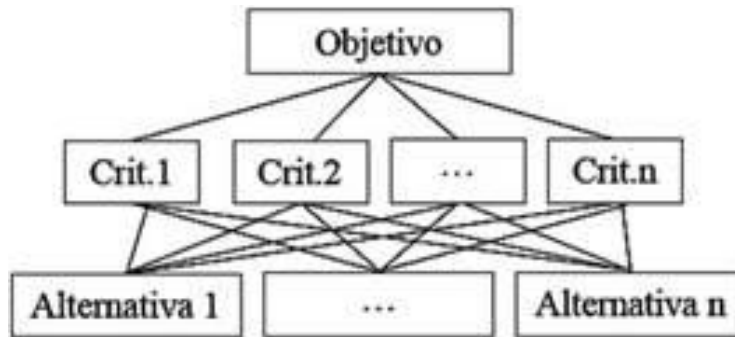


Figura 11 Estructura Jerárquica.

Por este motivo, se eligió la escala de Saaty, mostrada en la Tabla 5, para definir los valores que pueden tomar los juicios de los expertos. Esta escala sirve como una representación de los juicios de valor al comparar dos alternativas respecto a un criterio específico, estableciendo la importancia o preferencia en la matriz de comparaciones por pares. Dichas comparaciones pareadas pueden basarse en la intuición, datos, análisis previos o experiencias, proporcionando así homogeneidad y un grado de certeza a cada comparación.

Tabla 5 Escala de Saaty. Tomado de (SMITH et al., 2000)

Nivel de importancia	Definición	Explicación
1	Igual importancia	Dos elementos contribuyen igualmente al objetivo
3	Importancia moderada	La experiencia y el juicio favorecen ligeramente un elemento sobre otro
5	Fuerte importancia	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente un elemento sobre otro.
7	Importancia muy fuerte o demostrada	Un elemento se favorece muy fuertemente sobre otro; su dominio es demostrado en la práctica.
9	Importancia extrema	La evidencia que favorece un elemento sobre otro es del orden de afirmación más alto posible.
2,4,6,8	Valores intermedios	En casos necesarios.

La relevancia del AHP radica en la determinación de pesos relativos para evaluar las alternativas. Suponiendo que existen n criterios en una jerarquía específica, el AHP establece una matriz de comparación por pares A de $n \times n$, que mide el juicio del tomador de decisiones sobre la importancia relativa de cada criterio. La comparación por pares se realiza de manera que el criterio en la fila i ($i=1, 2, 3, \dots, n$) se evalúa con respecto a cada criterio alternativo. Si a_{ij} representa el elemento (i, j) de A , el AHP utiliza la escala de Saaty del 1 al 9, donde $a_{ij} = 1$ indica que i y j tienen igual importancia para el experto (Mendoza et al., 2019). Luego, $a_{ij} = 5$ sugiere que i es más importante que j y $a_{ij} = 9$ señala que i es extremadamente más importante que j . Otros valores intermedios reflejan grados relativos de importancia. Además, se requiere consistencia en el proceso, es decir, si $a_{ij} = k$ entonces $a_{ji} = 1/k$, y todos los elementos diagonales a_{ii} son iguales a 1, ya que califican cada criterio contra sí mismo (Mendoza et al., 2019).

Una vez recopilados los juicios individuales de los expertos, se calculan los pesos relativos de cada criterio normalizando la matriz para crear una nueva. Este proceso implica dividir cada elemento de la columna entre la suma de esta. Para calcular los vectores de prioridad de cada criterio, es necesario promediar cada fila de la matriz normalizada.

3.4.1 Medida de consistencia

Además, es crucial evaluar la consistencia de la matriz, ya que esto refleja el juicio racional del experto, ya sea ambiental o de desarrollador de producto. Para determinar qué nivel de inconsistencia es tolerable o aceptable, se debe considerar una medida cuantificable de

consistencia. El cálculo del cociente de consistencia para cada matriz se obtiene siguiendo el siguiente algoritmo:

- a) Para cada fila de la matriz de comparación, calcular una suma ponderada basada en el producto de cada elemento por la prioridad calculada de cada criterio.
- b) Dividir la suma ponderada de cada elemento del vector resultante del paso anterior por la prioridad de su criterio correspondiente.
- c) Determinar la media λ_{\max} del resultado del paso anterior.
- d) Calcular el índice de consistencia (CI) para cada criterio, donde n es el número de criterios y/o alternativas a tener en cuenta en la matriz. La fórmula matemática se presenta en la siguiente ecuación:

$$i. \quad CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$$

- e) El índice aleatorio (IA) debe determinarse, y esto puede calcularse empíricamente como el promedio del CI de una gran muestra de matrices de comparación generadas al azar. La expresión correspondiente se presenta en la ecuación:

$$ii. \quad IA = \frac{1,98(N-2)}{n}$$

- d) Establecer la razón de consistencia (CR) como se presenta en la ecuación:

$$1. CR = \frac{CI}{CA}$$

Si el resultado de la ecuación **iii** es menor o igual a 0,1, el nivel de inconsistencia se considera aceptable. En caso contrario, se recomienda que el experto revise sus estimaciones. Posteriormente, se deben eliminar aquellas valoraciones que presentaron una o más matrices inconsistentes. Luego, se formulan las matrices de valoraciones consensuadas, donde el valor de la comparación corresponderá a la media geométrica de las comparaciones por pares de los expertos que no presentaron inconsistencias.

Es por todo lo anterior y teniendo en cuenta el análisis multicriterio a AHP y teniendo en cuenta opinión experta se procede a realizar la herramienta.

3.4.2 Resultados

En este capítulo se presentan los resultados de la herramienta de análisis y selección basada en AHP, que descompone el objetivo en criterios y subcriterios, aplica comparaciones por pares para estimar prioridades, calcula pesos y verifica la consistencia de los juicios (regla $CR \leq 0,10$). La estructura jerárquica permite manejar pesos locales y globales, aportando trazabilidad al proceso y robustez al ranking de alternativas (Szabo et al., 2021).

Conforme a la guía metodológica LCA + MCA (COMPLIMENT), los datos ambientales se llevan por clasificación, caracterización y, cuando aplica, normalización, para luego ponderarse y agregarse con MCA y AHP hasta un índice único que facilita la comparación entre alternativas, conservando el enfoque cradle-to-grave y evitando el problem shifting (Hermann et al., 2007). En los resultados se reportan dos escenarios de preferencias (mayor peso a impactos ambientales vs. mayor peso al contexto empresarial) y un análisis de sensibilidad del ranking frente a variaciones en las ponderaciones, siguiendo el uso de AHP como método de valoración en LCA + MCA.

3.4.3 Introducción a la Herramienta

La herramienta de análisis, contenida en el **ANEXOS**

Anexo A. Reporte de revisión de literatura sobre métodos y herramientas para la evaluación del desempeño ambiental

Tabla 9 Resultado de la revisión de literatura académica. Fuente: Elaboración propia

Titulo	Autor / Año	Objetivo del Estudio	Metodología	Principales hallazgos
2022 EPI Framework	Wolf, M. J., et al. (2022)	Medir la proximidad de los países a los objetivos de política ambiental mediante indicadores, destacando líderes y rezagados en desempeño ambiental.	Índice de Desempeño Ambiental (EPI) de 2022 proporciona un resumen basado en datos del estado de la sostenibilidad en todo el mundo	El marco organiza 40 indicadores en 11 categorías de temas y tres objetivos de políticas, con ponderaciones mostradas en cada nivel como porcentaje de la puntuación total.
Hacia un método común para medir la sostenibilidad de los productos y las organizaciones en la Unión Europea	López F, Aloia (2022)	La Comisión Europea promueve la medición y comunicación del comportamiento ambiental de productos y organizaciones a lo largo de su ciclo de vida.	Recomendaciones UE. HAO. HAP. RCHAP.RSHAO. 16 impactos ambientales. Principios HC. Recomendaciones. Fases del método. Plan de Acción de Economía Circular 2020 UE	16 impactos ambientales potenciales Principios de estudio de huella ambiental.

Titulo	Autor / Año	Objetivo del Estudio	Metodología	Principales hallazgos
Sustainable Products in a Circular Economy - Towards an EU Product Policy Framework contributing to the Circular Economy	European Commission (2019)	La UE impulsa la economía circular para mejorar la sostenibilidad, promoviendo la vida prolongada de los productos y la minimización del consumo de recursos.	El Marco de Política de Productos de la UE, Ecodiseño y Etiquetado Energético, Compras Públicas Verdes (GPP), Responsabilidad Extendida del Productor (EPR), Ciclos de Productos en la Economía Circular. Categorías de productos prioritarias para la economía circular. Los métodos de Huella Ambiental.	Instrumentos de política en una economía circular apuntan a mantener el valor de productos mediante eco-innovación y tecnologías ambientales, destacando programas como Horizonte 2020 y la verificación de tecnologías ambientales (ETV).
Índice de Desempeño Ambiental (EPI)	Centro de Aplicaciones y Datos Socioeconómicos SEDAC (2022)	Evaluar cuantitativamente el desempeño ambiental de los países en relación con objetivos ambientales claramente definidos.	Índice de Desempeño Ambiental (EPI) de 2022 proporciona un resumen basado en datos del estado de la sostenibilidad en todo el mundo	El Índice de Desempeño Ambiental (EPI) de 2022 evalúa 180 países basándose en 40 indicadores en 11 categorías: calidad del aire, agua potable, gestión de residuos, biodiversidad, pesca, lluvia ácida, agricultura, recursos hídricos y cambio climático, para medir la salud ambiental, vitalidad de los ecosistemas y cambio climático.

Titulo	Autor / Año	Objetivo del Estudio	Metodología	Principales hallazgos
Green supply chain technology and organization performance: Moderating role of environmental dynamism and product-service innovation capability	Chaudhuri, Ranjan , et al. (2023)	Analizar el impacto de las estrategias de innovación verde en el desempeño organizacional dentro de la cadena de suministro.	Innovación verde, cadena de suministro verde	Los resultados muestran que la adopción de innovación verde (en productos, procesos, logística y servicios) mejora el desempeño de las empresas en sostenibilidad y eficiencia en la cadena de suministro.
New product development and sustainable performance of Chinese SMMEs: The role of dynamic capability and intra-national environmental forces	Liu, Yulong, et al. (2020)	Investigar la relación entre mecanismos ambientales regionales y el desarrollo sostenible de productos y rendimiento de las SMMEs.	El estudio analiza 1,321 muestras de SMMEs en China, utilizando una encuesta nacional para examinar las características del mercado regional y la capacidad dinámica de estas empresas.	Las fuerzas institucionales regionales, la intensidad emprendedora y la capacidad dinámica de las SMMEs moderan cómo el desarrollo de nuevos productos afecta el desempeño sostenible de las empresas, al reducir las limitaciones y dependencias de recursos específicos de las SMMEs.
Indicador de desempeño ambiental bajo el enfoque GSCM: Validación en empresas manufactureras de la región del Eje cafetero	Trujillo, Mariana (2018)	Desarrollar un indicador específico de desempeño ambiental para el enfoque de Gestión de la Cadena de Suministro Verde (GSCM).	Gestión de abastecimiento Verde(Green Supply ChainManagement,GSCM)) propone una metodología integral para diseñar y aplicar el indicador de desempeño ambiental. Esta metodología consta de varias etapas.	Modelo conceptual de las prácticas GSCM identificadas en la literatura Revisión Literatura sobre indicadores para el GSCM Metodología propuesta para el diseño y aplicación del indicador Indicador de medición del

Titulo	Autor / Año	Objetivo del Estudio	Metodología	Principales hallazgos
				desempeño ambiental bajo el enfoque GSCM
Sustainable product development and service approach for application in industrial lighting products	Wang, Shuyi, et al. (2021)	Buscar un equilibrio sostenible entre aspectos ambientales, sociales y económicos en el ciclo de vida de productos.	El enfoque propuesto se basa en dos fases: la fase de desarrollo del producto y la fase de servicio.	El nuevo producto tuvo un impacto ambiental un 46% menor que el del producto existente con la misma salida de luz. Approach for sustainable product development and service.A Flowchart implementing the SPDS procedure
Integrating Life Cycle Assessment in the Product Development Process: A Methodological Approach	Mendes da Luz, Leila (2018)	Integrar el Análisis de Ciclo de Vida (LCA) en el desarrollo de productos para evaluar impactos ambientales.	Selección de un producto representativo para análisis LCA. Realización del LCA del producto seleccionado e integración del LCA en cada fase del proceso de desarrollo del producto.	La metodología propuesta puede ayudar a las empresas a desarrollar productos más sostenibles al considerar los impactos ambientales desde las etapas iniciales del diseño. Research phases for the development of the present study. LCA as a predictive tool in the development of new Products Lca integration to PDP

Titulo	Autor / Año	Objetivo del Estudio	Metodología	Principales hallazgos
ECOLOGICAL ENGINEERING & ENVIRONMENTAL TECHNOLOGY	(Majerník et al., 2023)	Analizar el impacto ambiental y la sostenibilidad de sistemas de productos, equilibrando aspectos socioeconómicos y ambientales.	La norma ISO 14045 usa los estándares LCA ISO 14040 y 14044 para evaluar impactos ambientales del producto a lo largo de su ciclo de vida. También aborda los impactos y riesgos medioambientales gestionados por EMS según ISO o EMASIII.	Incorporación de indicadores de "crecimiento económico verde" de la OCDE y evaluación de la sostenibilidad de la producción, junto con una fórmula del desempeño ambiental. Se incluye un modelo para evaluar las fases del ciclo de vida del producto y la integración de esta evaluación con la sostenibilidad en el desarrollo de productos.
The investigation of environmental sustainability within product design: a critical review	(Delaney et al., 2022)	Identificar cómo el diseño de productos puede mejorar su sostenibilidad ambiental a través de factores fundamentales.	Realiza una revisión exhaustiva de la literatura durante las últimas cuatro décadas. Se analizan tendencias y se identifican los factores clave que pueden afectar la sostenibilidad ambiental en el proceso de diseño de productos.	Los factores clave para mejorar la sostenibilidad ambiental incluyen los "6Rs" (Reducir, Reutilizar, Reciclar, Rediseñar, Remanufacturar, Recuperar), gestión de residuos y energía, y análisis del ciclo de vida del producto.
Análisis de Ciclo de Vida (ACV): qué es y para qué sirve	Eurofins (2024)	Utilizar el análisis de ciclo de vida para identificar impactos ambientales principales de un producto en todas sus etapas.	ACV UNICAMENTE	Inventario del Ciclo de Vida (ACV) Evaluación de los Impactos del Ciclo de Vida Interpretación de resultados Metodologías: ISO 14040, ISO 14041, ISO 14042, ISO 14043:, ISO 14044.

Anexo B. Herramienta de análisis para la selección de métodos de evaluación y medición del desempeño ambiental de un producto del presente trabajo de grado, se inicia con una pestaña introductoria que contextualiza su propósito y uso. En esta sección, se proporciona una visión general del enfoque AHP y se destacan los principales objetivos de la herramienta: facilitar la selección y priorización de métodos de evaluación ambiental que sean coherentes con los criterios de impacto ambiental, contexto empresarial, eficiencia y efectividad, y normativa y compatibilidad. Además, presenta su estructura principal para el entendimiento y desarrollo de esta. A continuación, se muestra su estructura general:

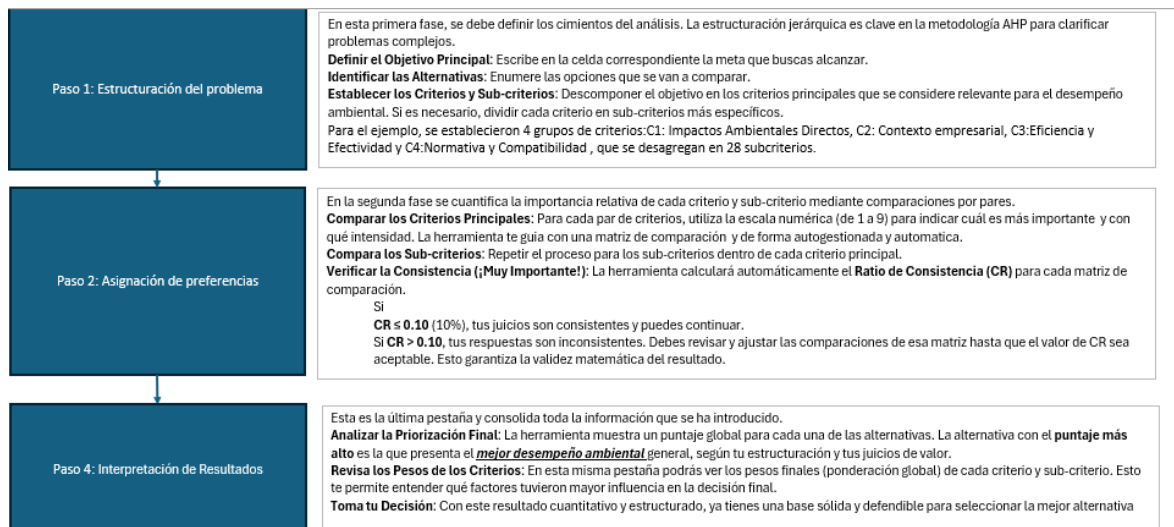


Figura 12 Estructura herramienta de análisis para selección de métodos de evaluación y medición del desempeño ambiental de un producto. Elaboración propia.

Además, se especifica que únicamente el profesional que utilice la herramienta solo puede interactuar con las celdas de un color específico relacionado visualmente en la herramienta.

3.4.4 Estructuración del problema

La segunda pestaña “Estructuración del problema” define la jerarquía AHP: objetivo, criterios, subcriterios y alternativas. Aquí se fijan los cuatro criterios del análisis (Impactos Ambientales Directos; Contexto Empresarial; Eficiencia y Efectividad; Normativa y Compatibilidad) y sus subcriterios, lo que establece el marco de referencia y permite

gestionar pesos locales y globales de forma transparente en el “árbol de criterios”. Esta estructuración es el paso metodológico que hace trazable la evaluación y la posterior priorización.

En este ejercicio, el nivel de alternativas se restringe al método seleccionado en el capítulo anterior Análisis de Ciclo de Vida (ACV); por tanto, la jerarquía se usa para ponderar y documentar preferencias sobre criterios y subcriterios, en coherencia con el enfoque LCA + MCA que, tras la clasificación, caracterización y (cuando aplica) normalización de impactos del LCA, utiliza MCA/AHP para la agregación en un índice de apoyo a la decisión (Hermann et al., 2007).

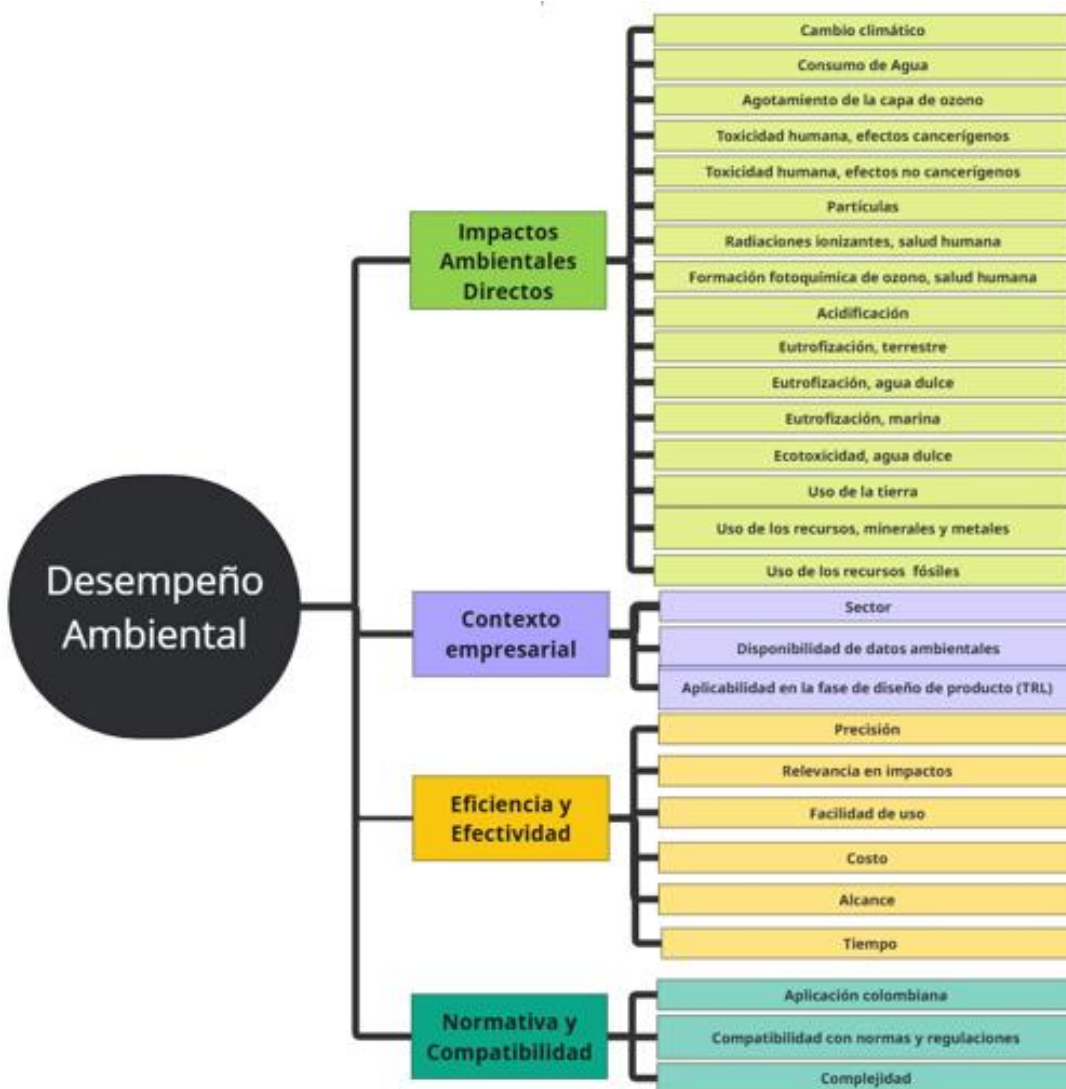


Figura 13 Árbol Jerárquico análisis multicriterio AHP para selección de método de desempeño ambiental. *Elaboración Propia*

3.4.5 Asignación de Preferencias

En la tercera pestaña, "Asignación de preferencias", se capturan los juicios de valor emitidos por el profesional dentro de la herramienta con relación a la importancia relativa de cada criterio y subcriterio. Utilizando la escala fundamental de Saaty mencionada anteriormente, se realizó comparaciones pareadas, permitiendo así establecer una matriz de comparación que reflejalos criterios con los pesos globales más altos, equivalente a mejor desempeño ambiental.

Los pesos locales (dentro de cada conjunto de subcriterios bajo un mismo padre) y los pesos globales (respecto al objetivo) se derivaron de esas matrices: el peso global de cualquier subcriterio de último nivel es el producto de su peso local por el peso global de su criterio padre (y, si aplica, por los pesos de todos los ancestros hasta la raíz). Por ejemplo, el peso global del subcriterio “Uso del Agua” se obtiene multiplicando su peso local por el peso global de “Impactos Ambientales Directos”; análogamente a los ejemplos reportados en AHP donde el global de un subcriterio resulta de su local multiplicado por el global del nodo padre:

Tabla 6 Vector de pesos globales y locales de los subcriterios. Elaboración propia

Criterios	Subcriterios	G	L
Impactos Ambientales Directos	Cambio climático	1,69%	6,3%
	Uso del Agua	3,33%	12,5%
	Agotamiento de la capa de ozono	1,48%	5,5%
	Toxicidad humana, efectos cancerígenos	4,97%	18,6%
	Toxicidad humana, efectos no cancerígenos	0,24%	0,9%
	Partículas	0,61%	2,3%
	Radiaciones ionizantes, salud humana	2,62%	9,8%
	Formación fotoquímica de ozono, salud humana	1,69%	6,3%
	Acidificación	1,18%	4,4%
	Eutrofización, terrestre	0,53%	2,0%
	Eutrofización, agua dulce	0,92%	3,5%
	Eutrofización, marina	0,70%	2,6%
	Ecotoxicidad, agua dulce	3,52%	13,2%
	Uso de la tierra	1,14%	4,3%
	Uso de los recursos, minerales y metales	1,69%	6,3%
Uso de los recursos fósiles	0,35%	1,3%	
Contexto Empresarial	Sector	4,79%	35,9%
	Disponibilidad de datos ambientales	1,02%	7,7%
	Aplicabilidad en la fase de diseño de producto (TRL)	7,52%	56,4%
Eficiencia y Efectividad	Precisión	0,52%	7,8%
	Relevancia en impactos	1,70%	25,5%
	Facilidad de uso	0,61%	9,2%
	Costo	2,47%	37,0%
	Alcance	0,24%	3,6%
	Tiempo	1,13%	17,0%
Normativa y Compatibilidad	Aplicación colombiana	34,31%	64,3%
	Compatibilidad con normas y regulaciones	15,08%	28,3%
	Complejidad	3,93%	7,4%

El vector anterior se identifican algunos criterios con mayor peso como lo es la Normatividad y Compatibilidad, seguido del impacto ambiental, después contexto empresarial y al final la eficiencia y efectividad. Para más profundidad consultar la herramienta **ANEXOS**

Anexo A. Reporte de revisión de literatura sobre métodos y herramientas para la evaluación del desempeño ambiental

Tabla 9 Resultado de la revisión de literatura académica. Fuente: Elaboración propia

Titulo	Autor / Año	Objetivo del Estudio	Metodología	Principales hallazgos
2022 EPI Framework	Wolf, M. J., et al. (2022)	Medir la proximidad de los países a los objetivos de política ambiental mediante indicadores, destacando líderes y rezagados en desempeño ambiental.	Índice de Desempeño Ambiental (EPI) de 2022 proporciona un resumen basado en datos del estado de la sostenibilidad en todo el mundo	El marco organiza 40 indicadores en 11 categorías de temas y tres objetivos de políticas, con ponderaciones mostradas en cada nivel como porcentaje de la puntuación total.
Hacia un método común para medir la sostenibilidad de los productos y las organizaciones en la Unión Europea	López F, Aloia (2022)	La Comisión Europea promueve la medición y comunicación del comportamiento ambiental de productos y organizaciones a lo largo de su ciclo de vida.	Recomendaciones UE. HAO. HAP. RCHAP.RSHAO. 16 impactos ambientales. Principios HC. Recomendaciones. Fases del método. Plan de Acción de Economía Circular 2020 UE	16 impactos ambientales potenciales Principios de estudio de huella ambiental.

Titulo	Autor / Año	Objetivo del Estudio	Metodología	Principales hallazgos
Sustainable Products in a Circular Economy - Towards an EU Product Policy Framework contributing to the Circular Economy	European Commission (2019)	La UE impulsa la economía circular para mejorar la sostenibilidad, promoviendo la vida prolongada de los productos y la minimización del consumo de recursos.	El Marco de Política de Productos de la UE, Ecodiseño y Etiquetado Energético, Compras Públicas Verdes (GPP), Responsabilidad Extendida del Productor (EPR), Ciclos de Productos en la Economía Circular. Categorías de productos prioritarias para la economía circular. Los métodos de Huella Ambiental.	Instrumentos de política en una economía circular apuntan a mantener el valor de productos mediante eco-innovación y tecnologías ambientales, destacando programas como Horizonte 2020 y la verificación de tecnologías ambientales (ETV).
Índice de Desempeño Ambiental (EPI)	Centro de Aplicaciones y Datos Socioeconómicos SEDAC (2022)	Evaluar cuantitativamente el desempeño ambiental de los países en relación con objetivos ambientales claramente definidos.	Índice de Desempeño Ambiental (EPI) de 2022 proporciona un resumen basado en datos del estado de la sostenibilidad en todo el mundo	El Índice de Desempeño Ambiental (EPI) de 2022 evalúa 180 países basándose en 40 indicadores en 11 categorías: calidad del aire, agua potable, gestión de residuos, biodiversidad, pesca, lluvia ácida, agricultura, recursos hídricos y cambio climático, para medir la salud ambiental, vitalidad de los ecosistemas y cambio climático.

Titulo	Autor / Año	Objetivo del Estudio	Metodología	Principales hallazgos
Green supply chain technology and organization performance: Moderating role of environmental dynamism and product-service innovation capability	Chaudhuri, Ranjan , et al. (2023)	Analizar el impacto de las estrategias de innovación verde en el desempeño organizacional dentro de la cadena de suministro.	Innovación verde, cadena de suministro verde	Los resultados muestran que la adopción de innovación verde (en productos, procesos, logística y servicios) mejora el desempeño de las empresas en sostenibilidad y eficiencia en la cadena de suministro.
New product development and sustainable performance of Chinese SMMEs: The role of dynamic capability and intra-national environmental forces	Liu, Yulong, et al. (2020)	Investigar la relación entre mecanismos ambientales regionales y el desarrollo sostenible de productos y rendimiento de las SMMEs.	El estudio analiza 1,321 muestras de SMMEs en China, utilizando una encuesta nacional para examinar las características del mercado regional y la capacidad dinámica de estas empresas.	Las fuerzas institucionales regionales, la intensidad emprendedora y la capacidad dinámica de las SMMEs moderan cómo el desarrollo de nuevos productos afecta el desempeño sostenible de las empresas, al reducir las limitaciones y dependencias de recursos específicos de las SMMEs.
Indicador de desempeño ambiental bajo el enfoque GSCM: Validación en empresas manufactureras de la región del Eje cafetero	Trujillo, Mariana (2018)	Desarrollar un indicador específico de desempeño ambiental para el enfoque de Gestión de la Cadena de Suministro Verde (GSCM).	Gestión de abastecimiento Verde(Green Supply ChainManagement,GSCM)) propone una metodología integral para diseñar y aplicar el indicador de desempeño ambiental. Esta metodología consta de varias etapas.	Modelo conceptual de las prácticas GSCM identificadas en la literatura Revisión Literatura sobre indicadores para el GSCM Metodología propuesta para el diseño y aplicación del indicador Indicador de medición del

Titulo	Autor / Año	Objetivo del Estudio	Metodología	Principales hallazgos
				desempeño ambiental bajo el enfoque GSCM
Sustainable product development and service approach for application in industrial lighting products	Wang, Shuyi, et al. (2021)	Buscar un equilibrio sostenible entre aspectos ambientales, sociales y económicos en el ciclo de vida de productos.	El enfoque propuesto se basa en dos fases: la fase de desarrollo del producto y la fase de servicio.	El nuevo producto tuvo un impacto ambiental un 46% menor que el del producto existente con la misma salida de luz. Approach for sustainable product development and service.A Flowchart implementing the SPDS procedure
Integrating Life Cycle Assessment in the Product Development Process: A Methodological Approach	Mendes da Luz, Leila (2018)	Integrar el Análisis de Ciclo de Vida (LCA) en el desarrollo de productos para evaluar impactos ambientales.	Selección de un producto representativo para análisis LCA. Realización del LCA del producto seleccionado e integración del LCA en cada fase del proceso de desarrollo del producto.	La metodología propuesta puede ayudar a las empresas a desarrollar productos más sostenibles al considerar los impactos ambientales desde las etapas iniciales del diseño. Research phases for the development of the present study. LCA as a predictive tool in the development of new Products Lca integration to PDP

Titulo	Autor / Año	Objetivo del Estudio	Metodología	Principales hallazgos
ECOLOGICAL ENGINEERING & ENVIRONMENTAL TECHNOLOGY	(Majerník et al., 2023)	Analizar el impacto ambiental y la sostenibilidad de sistemas de productos, equilibrando aspectos socioeconómicos y ambientales.	La norma ISO 14045 usa los estándares LCA ISO 14040 y 14044 para evaluar impactos ambientales del producto a lo largo de su ciclo de vida. También aborda los impactos y riesgos medioambientales gestionados por EMS según ISO o EMASIII.	Incorporación de indicadores de "crecimiento económico verde" de la OCDE y evaluación de la sostenibilidad de la producción, junto con una fórmula del desempeño ambiental. Se incluye un modelo para evaluar las fases del ciclo de vida del producto y la integración de esta evaluación con la sostenibilidad en el desarrollo de productos.
The investigation of environmental sustainability within product design: a critical review	(Delaney et al., 2022)	Identificar cómo el diseño de productos puede mejorar su sostenibilidad ambiental a través de factores fundamentales.	Realiza una revisión exhaustiva de la literatura durante las últimas cuatro décadas. Se analizan tendencias y se identifican los factores clave que pueden afectar la sostenibilidad ambiental en el proceso de diseño de productos.	Los factores clave para mejorar la sostenibilidad ambiental incluyen los "6Rs" (Reducir, Reutilizar, Reciclar, Rediseñar, Remanufacturar, Recuperar), gestión de residuos y energía, y análisis del ciclo de vida del producto.
Análisis de Ciclo de Vida (ACV): qué es y para qué sirve	Eurofins (2024)	Utilizar el análisis de ciclo de vida para identificar impactos ambientales principales de un producto en todas sus etapas.	ACV UNICAMENTE	Inventario del Ciclo de Vida (ACV) Evaluación de los Impactos del Ciclo de Vida Interpretación de resultados Metodologías: ISO 14040, ISO 14041, ISO 14042, ISO 14043:, ISO 14044.

Anexo B. Herramienta de análisis para la selección de métodos de evaluación y medición del desempeño ambiental de un producto. El profesional puede jugar con los resultados modificando las matrices de criterios y alternativas nxn.

3.4.6 Resultado de Priorización

Los resultados de priorización se obtuvieron a partir de los vectores de prioridad calculados con AHP. Con ello se derivaron pesos locales y globales: el peso global de cada subcriterio resulta del producto entre su peso local y el peso global del nodo padre. Así se genera el ranking de criterios y subcriterios, que expresa su contribución relativa al objetivo.

En coherencia con la guía LCA + MCA, estos pesos alimentan la agregación hacia un índice único de desempeño ambiental, base objetiva para la decisión. Se reporta el vector de pesos globales de los subcriterios, mencionada anteriormente, y se contrastan dos estructuras de preferencia (mayor peso a impactos ambientales vs. mayor peso al contexto empresarial), evaluando la robustez del ranking mediante análisis de sensibilidad. Siguiendo con lo anterior, se mostrará el resultado A) dando mayor peso al ámbito ambiental, esto se logra modificando la Matriz de comparaciones pareadas de los Macro criterios en la pestaña “asignación de preferencias” quedando como resultado la siguiente matriz:

Tabla 7 Matriz de comparaciones pareadas de los Macro criterios con mayor peso en em ambito ambiental

Macro Criterios	Impactos ambientales	Contexto empresarial	Eficiencia y efectividad	Normativa y compatibilidad
Impactos ambientales	1,00	2,00	4,00	0,50
Contexto empresarial	0,50	1,00	2,00	0,25
Eficiencia y efectividad	0,25	0,50	1,00	0,13
Normativa y compatibilidad	2,00	4,00	8,00	1,00

El resultado da una matriz de comparación consistente (razón de consistencia $CR \leq 0,10$), cumpliendo los parámetros de AHP y validando los juicios del experto que operó la herramienta.

El Resultado A corresponde al escenario en el que se asigna mayor peso al ámbito ambiental; en este caso se recalcularon los vectores de prioridad y los pesos globales bajo esa preferencia, lo que—como es esperable en AHP—puede modificar el ranking frente a otras ponderaciones, manteniendo la coherencia del esquema LCA+MCA para la agregación hacia un índice único de decisión (Szabo et al., 2021).

A continuación, se muestra el primer resultado A) dando mayor peso ambiental:

Como se puede evidenciar en los resultados obtenidos a partir de la **Figura 14**, se define el siguiente orden de priorización para los criterios de mayor peso en el Desempeño ambiental:

1. Normativa y Compatibilidad (Peso global: 53.3%, local: 53.33%)

Este es, con diferencia, el criterio más relevante dentro del modelo, representando más de la mitad del peso total. Refleja la importancia de asegurar que el desempeño ambiental se alinee con las regulaciones locales y normativas generales.

Subcriterios clave dentro de "Normativa y Compatibilidad":

- a) **Aplicación colombiana (G: 34.31%, L: 64.3%)**: Es el subcriterio más importante dentro de esta categoría, evidenciando una fuerte orientación hacia la aplicabilidad nacional del método.
- b) **Compatibilidad con normas y regulaciones (G: 15.08%, L: 28.3%)**: Destaca la necesidad de que el método se alinee con marcos regulatorios amplios.
- c) **Complejidad (G: 3.93%, L: 7.4%)**: Aunque menos relevante, se considera la facilidad de implementación normativa.

2. Impactos Ambientales Directos (G: 26.6%, L: 26.6%)

Es el segundo criterio en importancia. A pesar de su peso inferior al normativo, los impactos ambientales directos siguen siendo un pilar clave en la evaluación.

Subcriterios clave:

- a) **Consumo de agua (G: 3.33%, L: 12.5%)**: Es el subcriterio más relevante en esta categoría, dada la importancia del recurso hídrico.
- b) **Toxicidad humana, efectos cancerígenos (G: 4.97%, L: 11.3%)**: Representa un riesgo crítico para la salud humana y por ende se valora con alto peso.
- c) **Radiaciones ionizantes, salud humana (G: 2.62%, L: 8.9%)**: También se destaca por su impacto en la salud.
- d) **Ecotoxicidad, agua dulce (G: 3.52%, L: 6.3%) y Cambio climático (G: 1.69%, L: 6.3%)**: Aunque con valores más bajos, siguen siendo relevantes.

3. Contexto Empresarial (G: 13.33%, L: 13.33%)

Este criterio ocupa el tercer lugar en prioridad, resaltando el papel del entorno empresarial en la implementación de métodos de desempeño ambiental.

Subcriterios clave:

- a) **Aplicabilidad en la fase de diseño de producto (TRL) (G: 7.52%, L: 56.4%)**: Es el factor dominante en esta categoría, destacando la importancia del enfoque desde etapas tempranas.
- b) **Sector (G: 4.79%, L: 35.9%)**: Evalúa la relación del método con sectores específicos.
- c) **Disponibilidad de datos ambientales (G: 1.02%, L: 7.7%)**: Es el menos relevante del grupo, aunque necesario para una implementación efectiva.

4. Eficiencia y Efectividad (G: 6.67%, L: 6.67%)

Es el criterio con menor peso general. Aunque no es prioritario frente a los anteriores, proporciona indicadores importantes sobre la practicidad del método.

Subcriterios clave:

- a) **Relevancia en impactos (G: 1.67%, L: 25.1%)**: Es el subcriterio con mayor peso dentro de esta categoría.
- b) **Costo (G: 2.47%, L: 17.4%)**: También tiene una importancia considerable al evaluar la viabilidad económica del método.
- c) **Tiempo (G: 1.13%, L: 17.6%) y Precisión (G: 0.52%, L: 7.8%)**: Tienen importancia moderada.
- d) **Facilidad de uso (G: 0.61%, L: 6.2%) y Alcance (G: 0.24%, L: 1.6%)**: Son los menos relevantes, posiblemente negociables según las circunstancias del proyecto.

Estos resultados son fundamentales para la toma de decisiones estratégicas en la evaluación del desempeño para una correcta valoración, sino también alineados con las necesidades empresariales y normativas del profesional y el producto.

En contraste, ahora se muestra el resultado B) dando mayor peso al contexto empresarial, esto se logra modificando la Matriz de comparaciones pareadas de los Macro criterios en la pestaña “asignación de preferencias” quedando como resultado la siguiente matriz

Tabla 8 Matriz de comparaciones pareadas de los Macro criterios con mayor peso en el contexto empresarial

Macro Criterios	Impactos ambientales	Contexto empresarial	Eficiencia y efectividad	Normativa y compatibilidad
Impactos ambientales	1,00	2,00	4,00	0,50
Contexto empresarial	0,50	1,00	2,00	0,25
Eficiencia y efectividad	0,25	0,50	1,00	0,13
Normativa y compatibilidad	2,00	4,00	8,00	1,00

El resultado da una matriz de comparación consistente (razón de consistencia $CR \leq 0,10$), cumpliendo los parámetros de AHP y validando los juicios del experto que operó la herramienta.

El Resultado B corresponde al escenario en el que se asigna mayor peso al Contexto Empresarial; en este caso se recalcularon los vectores de prioridad y los pesos globales bajo esa preferencia, lo que—como es esperable en AHP—puede modificar el ranking frente a otras ponderaciones, manteniendo la coherencia del esquema LCA+MCA para la agregación hacia un índice único de decisión(Szabo et al., 2021).

:

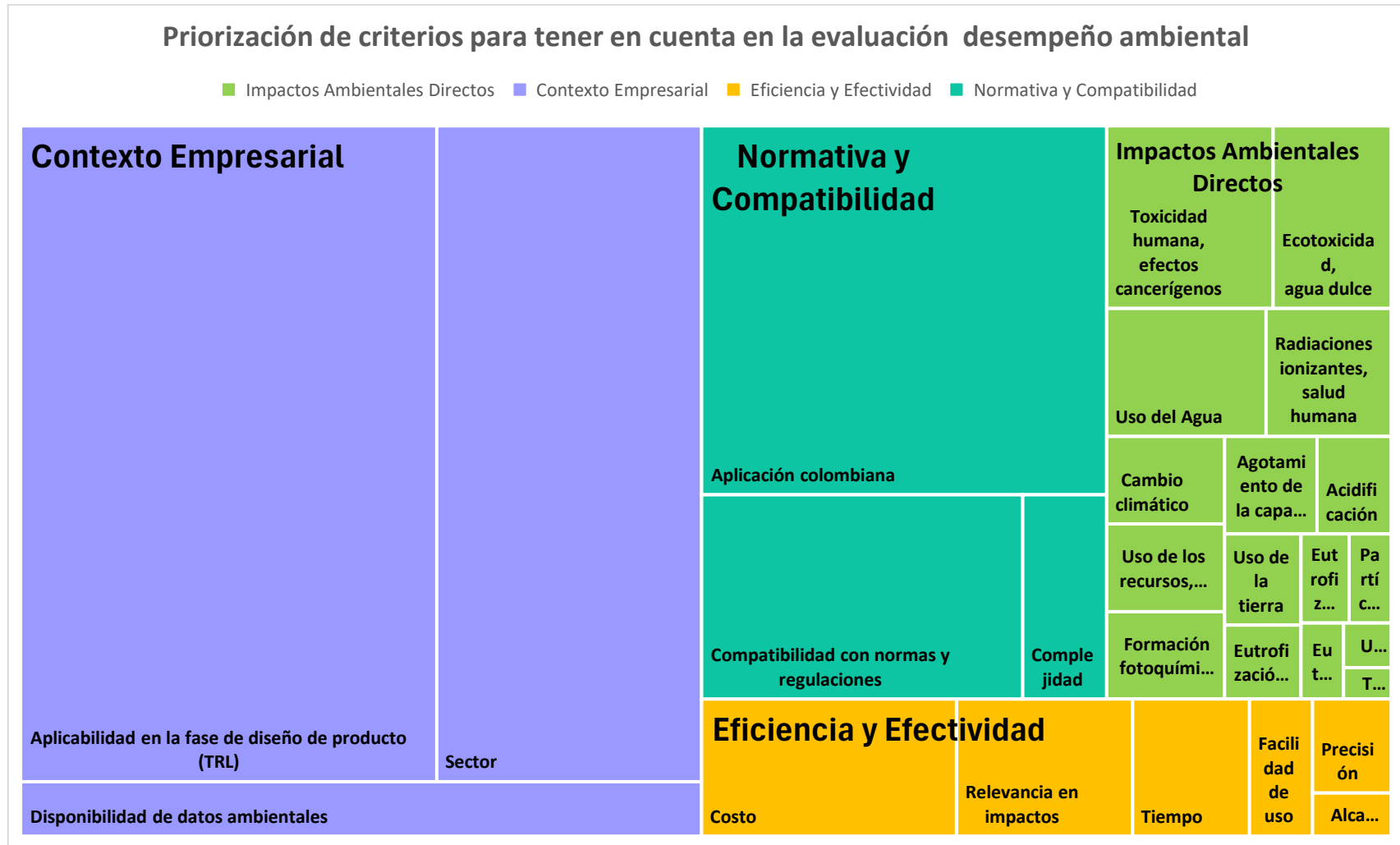


Figura 15 Priorización de criterios B) para el desempeño ambiental seleccionado para el caso hipotético planteado . Elaboración propia

Como se puede evidenciar en los resultados obtenidos a partir de la **Figura 15**, se define el siguiente orden de priorización para los criterios de mayor peso en el Desempeño ambiental:

1. Contexto Empresarial (Peso global: 49.7%, local: 49.7%)

Este es, con diferencia, el criterio más relevante dentro del modelo, representando casi la mitad del peso total.

Subcriterios clave dentro de "Contexto Empresarial":

- a) **Aplicabilidad en la fase de diseño de producto (TRL) (G: 28.05%, L: 56.4%)**: La capacidad de aplicar el método de desempeño ambiental en fases tempranas del ciclo de vida del producto (Technology Readiness Level - TRL) se considera el factor más crítico en la ruta. Lo que valida y refuerza el argumento central del presente trabajo de grado: la pertinencia de realizar la evaluación en etapas tempranas del desarrollo del producto que se muestra en el siguiente capítulo.
- b) **Sector (G: 17.8%, L: 35.9%)**: Evalúa la adecuación del método al sector empresarial correspondiente.
- c) **Disponibilidad de datos ambientales (G: 3.8%, L: 7.6%)**: Aunque relevante, tiene menor peso que los anteriores.

2. Normativa y Compatibilidad (G: 23.8%, L: 23.8%)

Es el segundo criterio en importancia, lo que refleja la necesidad de que cualquier método o acción esté alineado con normas y regulaciones.

Subcriterios clave:

- a) **Aplicación colombiana (G: 15.3%, L: 64.3%)**: Este es el subcriterio más importante dentro de esta categoría, lo que muestra un enfoque territorial claro.
- b) **Compatibilidad con normas y regulaciones (G: 6.7%, L: 28.3%)**: Considera la alineación con estándares normativos generales.
- c) **Complejidad (G: 1.7%, L: 7.4%)**: Evalúa la dificultad de implementar el método desde el punto de vista regulatorio.

3. Impactos Ambientales Directos (G: 16.8%, L: 16.8%)

Este criterio es el tercero en relevancia. Si bien los impactos ambientales directos son importantes, su peso es menor en comparación con los contextuales y normativos.

Subcriterios clave:

- a) **Toxicidad humana, efectos cancerígenos (G: 3.13%, L: 18.6%):** Con mayor peso en la categoría lo implica la importancia de los materiales con efecto dañinos directos a la salud humana
- b) **Ecotoxicidad en agua dulce (G: 2.22%, L: 13.2%):** Segundo en la categoría, evaluando la importancia a tener en cuenta en la contaminación que efectúa la empresa en agua.
- c) **Consumo de agua (G: 2.1%, L: 12.5%):** El consumo de agua como factor importante de medición dentro del desempeño ambiental.
- d) **Cambio climático (G: 1.07%, L: 6.3%):** Tiene un peso comparativamente bajo, lo cual puede discutirse en el análisis.

4. Eficiencia y Efectividad (G: 9.7%, L: 9.7%)

Es el criterio con menor peso global. Aunque sigue siendo relevante, se le otorga menor prioridad en la toma de decisiones.

Subcriterios clave:

- a) **Costo (G: 3.6%, L: 36.9%):** Es el factor más influyente dentro de esta categoría.
- b) **Relevancia en impactos (G: 2.5%, L: 25.5%)**
- c) **Tiempo (G: 1.6%, L: 16.9%)**
- d) **Precisión (G: 0.8%, L: 7.8%) y Alcance (G: 0.3%, L: 3.5%):** Tienen menor peso, lo que sugiere que podrían sacrificarse si otros factores clave se cumplen.

Para finalizar, se debe tener en cuenta que el método de desempeño ambiental trabajado es el Análisis de Ciclo de Vida (ACV). Este resultado es notablemente favorable, dado que el ACV es altamente compatible y familiarizado en Colombia, además de considerar toda la cadena de valor de un producto. Sin embargo, es importante aclarar que cada criterio priorizado y trabajado se adapta a las variables consideradas y a las calificaciones otorgadas por el evaluador en la herramienta. Esto subraya la flexibilidad y la adaptabilidad de la



herramienta, permitiendo que los resultados reflejen las prioridades y el contexto específico de cada evaluación.

4 RUTA DE DISEÑO DE PRODUCTOS CON LA INCORPORACIÓN DE LA EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO AMBIENTAL

Este capítulo cumple el Objetivo específico 3 al operacionalizar lo obtenido en los capítulos previos: caracterización de métodos e indicadores y herramienta de selección (matrices de clasificación y calificación, y guía LCA+MCA/AHP con escenarios A y B) en una ruta de diseño de nuevos productos que integra, de forma explícita, la evaluación del desempeño ambiental. La ruta se estructura por fases TRL (de idea a producto), definiendo para cada una de las actividades, entradas/salidas, responsables y puertas de decisión, donde se aplican los métodos priorizados, los indicadores ambientales y las preferencias (énfasis en impactos o en contexto empresarial). El resultado es un procedimiento iterativo y trazable, adaptable a bienes y servicios, que guía a equipos de diseño y a la consultoría corporativa en la selección informada de métodos, el seguimiento de indicadores y la incorporación progresiva de mejoras ambientales a lo largo del ciclo de vida.

4.1 Metodología para proponer la ruta de diseño

Las empresas de consultoría corporativa por lo general emplean diversas metodologías y herramientas para el desarrollo de nuevos negocios y productos. Entre estas metodologías se incluyen enfoques como Canvas, Lean Start Up, Lean Canvas, Design Thinking y agilismo, cuyo propósito es prototipar, testear e iterar en el proceso (Aqua Fundación, 2021). A continuación, se detalla una metodología de creación de una ruta de desarrollo de producto que engloba de forma general este proceso y que es uno de los elementos que se tendrá en cuenta para el desarrollo de la ruta teniendo en cuenta el desempeño ambiental:

- Paso 1: Investigación de la Industria y las Tendencias: En este paso, se analiza el entorno relacionado con la idea del producto, aplicando técnicas y herramientas de

inteligencia competitiva. Esto permite obtener una comprensión profunda del mercado, identificar oportunidades y amenazas, y anticipar cambios en la industria.

- Paso 2: Propuesta de Valor: A través de la caracterización de los clientes, se establecen elementos y características de la oferta que son considerados de alto valor. Este paso es crucial para definir claramente cómo el producto o servicio resolverá los problemas o satisfará las necesidades de los clientes.
- Paso 3: Modelo de Negocio (Deseabilidad) Se aplican herramientas etnográficas para validar el problema o necesidad relacionada con la idea de negocio. La validación asegura que existe una demanda real y que el negocio tiene potencial para ser exitoso.
- Paso 4: Prototipado Mediante la creación de prototipos iniciales de la oferta, se definen experimentos para el testeado de la mano del cliente. Esta etapa permite iterar rápidamente sobre el producto, incorporando feedback de los usuarios para mejorar y ajustar la propuesta.
- Paso 5: Diseño MVP y Estrategias de Comercialización: Se construye el MVP (Producto Mínimo Viable) en su totalidad para realizar las respectivas validaciones de mercado. Esta etapa incluye la planificación del roadmap de desarrollo y las estrategias de comercialización para asegurar una entrada efectiva al mercado.

De la mano de los pasos anteriores y con la investigación realizada en el presente trabajo, la Superintendencia de Industria y Comercio de Colombia ha publicado una guía de comercialización de conocimiento y tecnología. Este documento plantea las etapas de desarrollo de producto y su relación con el nivel de madurez tecnológica, conocido puntualmente como TRL (Technology Readiness Level). Esta guía ha sido fundamental para la elaboración de la ruta. A continuación, se muestra la ruta desarrollada por la Superintendencia de Industria y Comercio (Antonio et al., 2024):

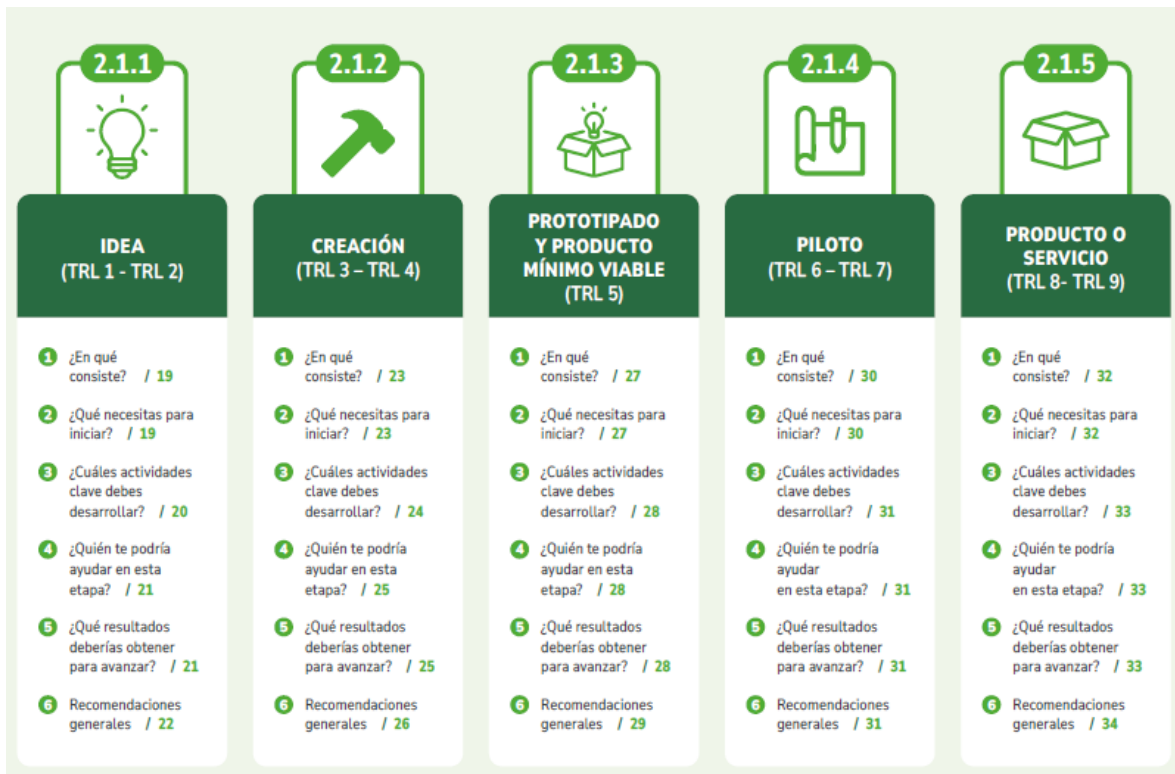


Figura 16 Ruta de desarrollo de producto. Tomado de (Antonio et al., 2024)

También, En base a la experiencia adquirida a través de diversas colaboraciones en el ámbito de consultorías especializadas en innovación, se ha desarrollado una comprensión profunda de los procesos y metodologías que impulsan la innovación efectiva en el desarrollo de producto. Este conocimiento práctico ha sido fundamental para orientar y sustentar los análisis y propuestas presentados en este trabajo y que darán la ruta final propuesta.

4.2 Resultados

Finalmente, para sintetizar todo en una sola ruta y teniendo en cuenta todo lo anteriormente expuesto se genera las fases, actividades de la ruta de diseño de nuevos productos que permiten incorporar la evaluación de desempeño ambiental con la herramienta expuesta en el capítulo 3.

4.2.1 Fase 1: Selección de método de desempeño ambiental

En esta fase, se desarrolló una herramienta en Excel, que se expone en el capítulo 3. Esta herramienta ayuda a seleccionar el método de evaluación de desempeño ambiental adecuado.

4.2.1.1 Actividades:

1. Desarrollo de la estructura jerárquica: Definir una estructura que organice los criterios y subcriterios de evaluación.
2. Asignación de preferencias: Asignar pesos a los diferentes criterios según su importancia.
3. Valoración de alternativas: Evaluar diferentes alternativas según los casos específicos.
4. Resultado de priorización: Obtener un método de desempeño ambiental prioritario basado en las valoraciones.
5. Ejecución del método: Aplicar el método seleccionado para evaluar el desempeño ambiental.

Después de esta fase, el profesional puede iniciar la fase de desarrollo de producto en el punto de madurez tecnológica donde se encuentre su producto.

4.2.2 Fase 2: Idea (TRL 1 - TRL 2)

Esta fase se centra en la identificación y exploración de una problemática o una oportunidad de mercado. Se realiza una investigación tanto primaria como secundaria para entender mejor el contexto y las necesidades del mercado. Se estima el mercado potencial y se selecciona un foco específico para el desarrollo del producto. Esta etapa es crucial para definir la visión inicial y el propósito del producto.

4.2.2.1 Actividades:

1. Investigación - Idea: Explorar la problemática o oportunidad que se quiere abordar.
2. Mapa de hipótesis: Identificar hipótesis iniciales que deben ser probadas.
3. Investigación primaria y secundaria: Recopilar información relevante mediante diferentes fuentes.
4. Estimación de mercado potencial: Evaluar el tamaño del mercado y la demanda potencial.
5. Resumen de la oportunidad: Sintetizar la información para definir claramente la oportunidad.

6. Selección de foco: Elegir el área específica donde se enfocará el desarrollo del producto.

4.2.3 Fase 3: Creación (TRL 3 - TRL 4)

Durante la fase de creación, se desarrolla la propuesta de valor y el modelo de negocio. Se segmenta y perfila al cliente objetivo, y se realiza un análisis competitivo y de valor. A través del diseño de experimentos y la validación de hipótesis, se construye una base sólida para la oferta del producto. Esta etapa es fundamental para transformar una idea en una propuesta de producto viable y atractiva para el mercado.

4.2.3.1 Actividades:

1. Propuesta de valor: Definir el valor que el producto ofrecerá a los clientes.
2. Modelo de negocio: Desarrollar un plan para la creación y entrega de valor.
3. Segmentación del cliente y perfil: Identificar los segmentos de clientes y sus características.
4. Mapa de valor: Visualizar cómo el producto resolverá problemas o mejorará situaciones para los clientes.
5. Concepto de la oferta y análisis competitivo: Definir el producto y analizar la competencia.
6. Diseño de experimentos y validación: Probar y validar las hipótesis y el diseño del producto.

4.2.4 Fase 4: Prototipado y Producto Mínimo Viable (TRL 5)

En esta fase, se desarrollan y validan prototipos del producto. Se identifican los atributos más importantes y se crean diferentes tipos de prototipos. La construcción y validación del prototipo mínimo viable (MVP) permiten realizar ajustes y asegurarse de que el producto cumple con los requisitos mínimos necesarios. Esta etapa es esencial para probar la viabilidad técnica y de mercado del producto.

4.2.4.1 Actividades:

1. Atributos importantes: Identificar los atributos más importantes del producto.
2. Tipos de prototipos: Desarrollar diferentes tipos de prototipos.
3. Construcción del piloto: Crear un prototipo piloto.

4. Validación de prototipo: Probar y ajustar el prototipo para asegurar que cumple con los requisitos mínimos.
5. Producto Mínimo Viable: Definir el producto mínimo viable (MVP).
6. Pitch: Preparar y presentar el MVP.

4.2.5 Fase 5: Piloto (TRL 6 - TRL 7)

La fase piloto implica la implementación y validación del producto en un entorno real. Se realiza un análisis de riesgos y financiero, y se selecciona el mercado objetivo. El producto se prueba en condiciones reales, se realizan ajustes y mejoras, y se decide si está listo para el lanzamiento comercial. Esta fase es crucial para asegurar que el producto es robusto y listo para el mercado.

4.2.5.1 Actividades:

1. Análisis de riesgo y financiero: Evaluar riesgos y analizar la viabilidad financiera.
2. Mercado objetivo y selección del público: Identificar el mercado y los clientes objetivo.
3. Implementación del piloto: Desplegar el piloto del producto.
4. Validación y ajustes: Probar el producto en un entorno real y hacer ajustes necesarios.
5. Decisión de lanzamiento: Decidir si el producto está listo para el lanzamiento comercial.
6. Escalabilidad y documentación: Preparar el producto para la producción a mayor escala y documentar el proceso.

4.2.6 Fase 6: Producto (TRL 8 - TRL 9)

En la fase final, el producto se lanza y comercializa. Se implementan las operaciones necesarias para la producción y distribución, y se llevan a cabo estrategias de marketing y publicidad para promover el producto. La primera venta y distribución marcan la entrada del producto al mercado. Esta fase asegura que el producto está plenamente operativo y cumple con las expectativas de los clientes, siendo ambientalmente responsable.

4.2.6.1 Actividades:

1. Operación: Implementar la operación del producto.
2. Lanzamiento y comercialización: Lanzar y comercializar el producto.

3. Marketing y publicidad: Promover el producto.
4. Primera venta y distribución: Realizar las primeras ventas y distribuir el producto.

4.2.7 Resultado Final

Al final del proceso, se obtiene un producto o servicio que ha sido evaluado y optimizado en términos de desempeño ambiental, asegurando que es ambientalmente responsable.

A continuación, se expresa de manera gráfica todo lo anterior en una sola ruta:

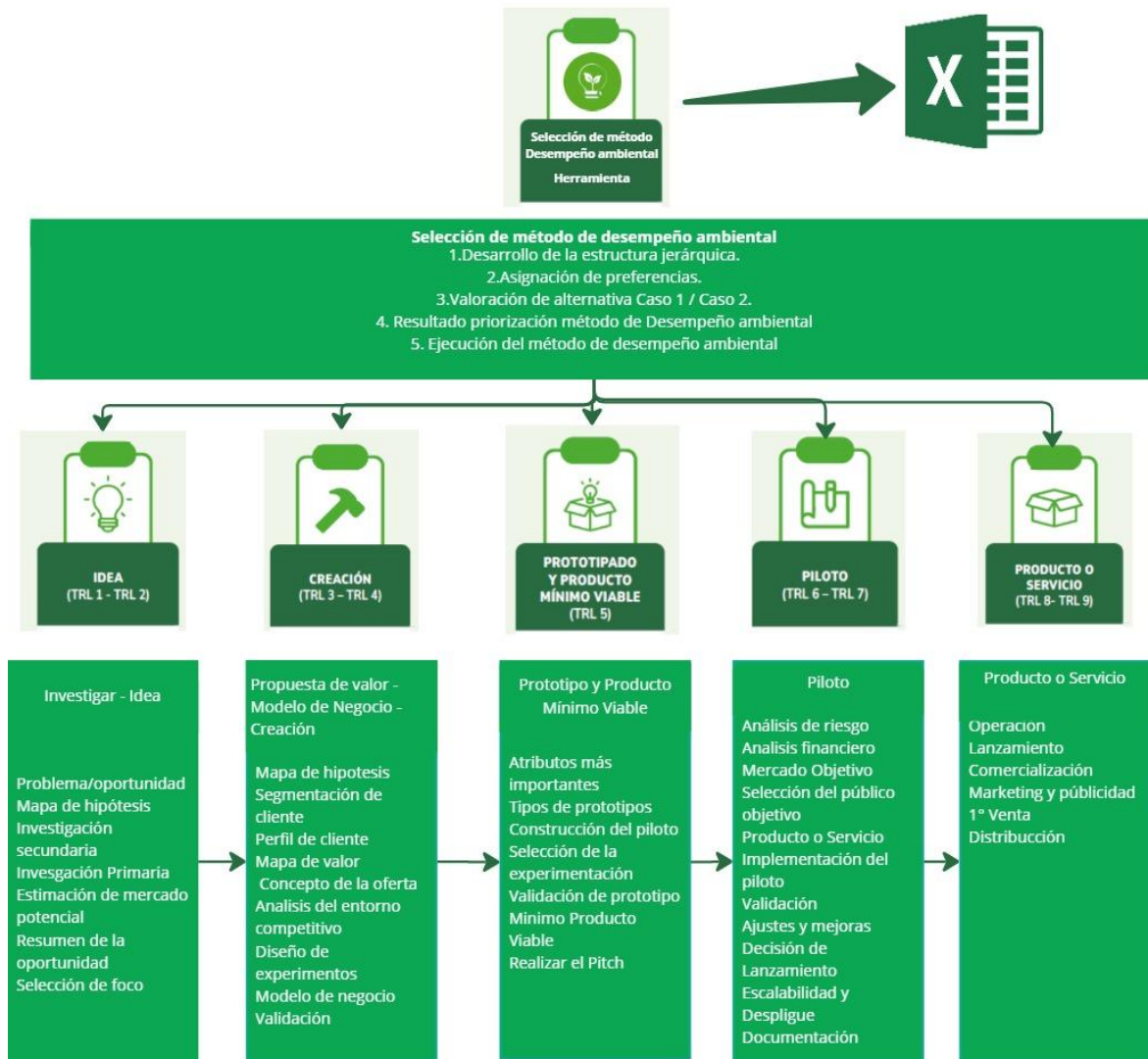


Figura 17 Ruta de diseño de nuevos productos que permiten incorporar la evaluación de desempeño ambiental. Elaboración propia. Adaptado de(Antonio et al., 2024)(Antonio et al., 2024)

5 Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

- La integración de la evaluación del desempeño ambiental en el desarrollo de productos es crucial para mitigar impactos negativos y promover la sostenibilidad.
- El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) se destaca como el método más adecuado para evaluar el desempeño ambiental debido a su capacidad de considerar toda la cadena de valor del producto.
- La herramienta desarrollada es flexible y adaptable, permitiendo que los resultados reflejen las prioridades y el contexto específico de cada evaluación.
- La validación de la herramienta en condiciones reales es esencial para asegurar su robustez y preparación para el mercado.
- Sectores como la consultoría corporativa y otros profesionales deben comprometerse con prácticas sostenibles, lo que indica una tendencia hacia la integración del desempeño ambiental en el desarrollo de productos.
- La implementación de estrategias de diseño ecológico y circular es crucial para reducir el impacto ambiental en sectores como la construcción y la automoción.
- La medición de la huella de carbono es una herramienta esencial para entender y mitigar los efectos negativos de las actividades humanas sobre el medio ambiente.
- Empresas en diversos sectores están adoptando prácticas de sostenibilidad, influenciadas por la presión normativa y del mercado.
- Las normativas y acuerdos internacionales, principalmente la Unión Europea están impulsando la creación de metodologías para la reducción de emisiones y la medición de la huella de carbono.
- Es fundamental que las empresas integren la sostenibilidad en todas las etapas del ciclo de vida de los productos para mejorar su desempeño ambiental.

- La colaboración entre diferentes disciplinas y sectores es esencial para desarrollar productos sostenibles y mejorar el desempeño ambiental.

5.2 Recomendaciones

- Incorporar la evaluación del desempeño ambiental desde las etapas iniciales del diseño de productos para asegurar un enfoque sostenible desde la concepción de la idea hasta el primer acercamiento investigativo.
- Promover el uso del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) como método estándar para evaluar el desempeño ambiental de los productos.
- Validar la herramienta y metodología desarrollada con profesionales del sector para asegurar su efectividad y aplicabilidad.
- Utilizar plataformas como EcoVadis para evaluar y mejorar continuamente la sostenibilidad de las operaciones empresariales son un aliado para empresas que buscan reducir su impacto ambiental.
- Asegurar que los productos y procesos cumplan con las normativas internacionales de sostenibilidad y reducción de emisiones.
- Implementar estrategias de diseño ecológico y economía circular en el desarrollo de productos para reducir el impacto ambiental.
- Capacitar a los empleados y colaboradores sobre la importancia y las técnicas de evaluación del desempeño ambiental.
- Fomentar la colaboración entre empresas, gobiernos y organizaciones no gubernamentales para impulsar prácticas sostenibles y que fortalezcan en Sistema Nacional de Ciencia Tecnología e Innovación.
- Establecer sistemas de monitoreo y reporte continuo del desempeño ambiental para identificar áreas de mejora.
- Desarrollar productos innovadores que no solo satisfagan las necesidades del mercado, sino que también sean ambientalmente responsables.

6 Referencias

- Antonio, L., Rubio, S., Bermúdez, A., Daniel, H., Castiblanco, A., Milena, R. E., Rodríguez, B., Andrés, D., Bernal, E., Gineth, E., Casas, P., Mayerly, A., Montañez, F., Equipo, K., Mojica González, P., Castaño, S., Carlos, D., Franco, D., Mónica, F., ... Camacho, C. (2024). *Comercialización de conocimiento y tecnología GUÍA VERSIÓN 1.0. Comercialización de conocimiento y tecnología*.
- Aqua Fundación. (2021). *La metodología design thinking: definición y fases*.
<https://www.fundacionaqua.org/wiki/que-es-el-design-thinking/>
- Aristizábal Alzate, C. E., González Manosalva, J. L., & Gutiérrez Cano, J. C. (2020). Life cycle assessment and carbon footprint calculus for a pet bottles recycling process at medellin (ant). *Produccion y Limpia*, 15(1), 7–24.
<https://doi.org/10.22507/PML.V15N1A1>
- Brown, T. (2019). *Change by Design*.
- Burck Jan, Unlich Thea, Bals Christoph, Hohne Niklas, & Leonardo Nascimento. (2022). *CCPI-Climate ChangesPerformance Index*.
- Callahan, W., James Fava, S. A., Wickwire, S., Sottong, J., Stanway, J., & Ballentine, M. (2011). *Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard GHG Protocol Team*.
https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/Product-Life-Cycle-Accounting-Reporting-Standard_041613.pdf
- Carbon Trust. (2020). Product carbon footprint label. *Product Carbon Footprint Labelling: Consumer Research 2020*.
- Chomkham Sri, K., & Pelletier, N. (2011). *Analysis of Existing Environmental Footprint Methodologies for Products and Organizations: Recommendations, Rationale, and Alignment Institute for Environment and Sustainability (IES)*.
- Comité técnico CTN 198 Sostenibilidad en la construcción. (2020). (EX)UNE-EN_15804=2012+A2=2020.
- Costa, M. D., & Opare, S. (2024). Impact of Corporate Culture on Environmental Performance. *Journal of Business Ethics*. <https://doi.org/10.1007/s10551-024-05674-3>
- Damiani, M., Ferrara, N., & Ardente, F. (2022). Understanding PEF and EEF methods. *European Commission*.

- De Schryver, A., & Zampori, L. (2022). Product Carbon Footprint standards: which one to choose? *PRé Sustainability*.
- Delaney, E., Liu, W., Zhu, Z., Xu, Y., & Dai, J. S. (2022). The investigation of environmental sustainability within product design: a critical review. In *Design Science* (Vol. 8). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/dsj.2022.11>
- Departamento de Desarrollo Económico, S. y M. A. G. V. (2023). *INFORME DE VIGILANCIA AMBIENTAL ESTRATÉGICA: LAS 10 CLAVES EN ECONOMÍA CIRCULAR PARA 2024*. www.basqueecodesigncenter.net
- DiMento, J. F. C., Doughman, P., & Levesque, S. (2014). Climate change : what it means for us, our children, and our grandchildren. *Worldfinancialreview-Dimento-Climate-Change*.
- Duque Marqués, I., & Mac Master, B. (2021). *Una baja huella de carbono: La nueva competitividad*.
- Ecovadis SAS. (2022). *Plataforma Ecovadis*. <https://ecovadis.com/es/>
- Elia, V., Gnoni, M. G., & Tornese, F. (2017). Measuring circular economy strategies through index methods: A critical analysis. *Journal of Cleaner Production*, 142, 2741–2751. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.196>
- Environmental Performance Index (EPI), M.J, W., J.W., E., D.C., E., A., de S., & Z.A., W. (2022). *Yale Center for Environmental Law & Policy*. epi.yale.edu
- Feijoo, G., & Moreira, M. T. (2020). *ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA Y HUELLA DE CARBONO*. www.usc.gal/cretus
- Garcia, R., & Freire, F. (2014). Carbon footprint of particleboard: A comparison between ISO/TS 14067, GHG Protocol, PAS 2050 and Climate Declaration. *Journal of Cleaner Production*, 66, 199–209. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.11.073>
- Hannemann, L. (2019). Sustainability consultancies and their contribution to sustainable development. In *Contributions to Management Science* (pp. 229–249). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-95999-3_11
- Harris, S., Martin, M., & Diener, D. (2021). Circularity for circularity's sake? Scoping review of assessment methods for environmental performance in the circular economy. In *Sustainable Production and Consumption* (Vol. 26, pp. 172–186). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2020.09.018>
- Hermann, B. G., Kroeze, C., & Jawjit, W. (2007). Assessing environmental performance by combining life cycle assessment, multi-criteria analysis and environmental

- performance indicators. *Journal of Cleaner Production*, 15(18), 1787–1796.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2006.04.004>
- Hermundsdottir, F., & Aspelund, A. (2021). Sustainability innovations and firm competitiveness: A review. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 280). Elsevier Ltd.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124715>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2023). Technical Summary. In *Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability* (pp. 37–118). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844.002>
- International Organization for Standardization. (2006). ISO 14040:2006 Environmental management -- Life cycle assessment -- Principles and framework. In *ISO*.
- ISO. (2018). *ISO 14067:2018*.
- ISO. (2019). ISO 14064-3:2019. *ISO/TC 207/SC 7 Greenhouse Gas and Climate Change Management and Related Activities*. <https://www.iso.org/standard/66455.html>
- Jusmet, J. R. (2018). *La economía del cambio climático de William Nordhaus, premio Nobel 2018*. <http://www.ibtimes.com.au>
- Kean Fong, W., Sotos, M., Doust, M., Schultz, S., Marques, A., & Deng-Beck, C. (2021). *Global Protocol for Community-Scale Greenhouse Gas Inventories*.
- Krot, K., & Mazur, J. (2021). *Sustainability and New Product Development: A Review of the Literature*.
- Lenkiewicz, Z. (2024). *Beyond an age of waste Turning rubbish into a resource*. United Nations Environment Programme. <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/44939>
- Lockwood, T. (2010). *Design Thinking: Integrating Innovation, Customer Experience, and Brand Value*. Allworth Press.
- Majerník, M., Daneshjo, N., Malega, P., Chlpek, S., & Popovičová, D. (2023). Assessment of Environmental Performance and Development Sustainability of Systems Product. *Ecological Engineering and Environmental Technology*, 24(3), 192–200.
<https://doi.org/10.12912/27197050/160068>
- Maldona Morales, L., Sánchez Cervantes, J., Gómez Salazar, J. M., & Gómez Miranda, M. (2021). Design Thinking, Lean, Agile and Traditional Product Development: A Systematic Review. *International Journal of Innovation, Creativity and Change*, 15, 446–463.
- Manfredi, S., Allacker, K., Chomkamsri, K., Pelletier, N., & Maia De Souza, D. (2012). *Product Environmental Footprint (PEF) Guide Institute for Environment and*

Sustainability (IES) Product Environmental Footprint Guide; CONSOLIDATED VERSION.

- Marco Para El Establecimiento de Requisitos de Diseño Ecológico Aplicables a Los Productos Sostenibles y Se Deroga La Directiva 2009/125/CE, REGLAMENTO DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO 165 (2022). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/HTML/?uri=CELEX:52022PC0142&from=EN>
- Mendoza, A., Solano¹, C., Palencia¹, D., & Garcia¹, D. (2019). Aplicación del proceso de jerarquía analítica (AHP) para la toma de decisión con juicios de expertos Application of the Analytical Hierarchy Process (AHP) for decision-making with expert judgment. In *Revista chilena de ingeniería* (Vol. 27, Issue 3).
- MINISTERIO DEL AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. (2021). Tercer Informe Bienal de Actualización de Paraguay (IBA3) a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático. *Dirección Nacional de Cambio Climático de Paraguay*.
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, & Gobierno de España. (2023). *Información pública sobre el Proyecto de Real Decreto que modifica el Real Decreto 163/2014, de 14 de marzo, por el que se crea el registro de huella de carbono, compensación y proyectos de absorción de dióxido de carbono*.
- Naciones Unidas. (1992). *CONVENCION MARCO DE LAS NACIONES UNIDAS SOBRE EL CAMBIO CLIMATICO*.
- Naciones Unidas. (2022). *La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe*. www.cepal.org/es/suscripciones
- ONU, P. para el medio ambiente. (2024). *Guía para responsables de políticas públicas sobre el uso del análisis de ciclo de vida*.
- Pacto Mundial Red Española, & ECODES. (2022). *Empresas por el cero neto y la acción transformadora*.
- Palma, R. A., Beltran, B. D., Brotons, L. A., Arriba, P. Z., & Mengual, S. E. (2023). *Ecodesign for Sustainable Products Regulation-preliminary study on new product priorities Technical Report (draft) Circular economy and Sustainable Industry*. <https://joint-research-centre.ec.europa.eu>
- Pinkse, J., & Bohnsack, R. (2021). Sustainable product innovation and changing consumer behavior: Sustainability affordances as triggers of adoption and usage. *Business Strategy and the Environment*, 30(7), 3120–3130. <https://doi.org/10.1002/bse.2793>
- Presidencia de la Nación Argentina. (2019). *INVENTARIO NACIONAL DE GASES DE EFECTO INVERNADERO*. <https://inventariogei.ambiente.gob.ar>

- Quiroga Martínez, R. (2007). *Indicadores ambientales y de desarrollo sostenible : avances y perspectivas para América Latina y el Caribe*. CEPAL.
- Schwab, K. (2019). *The Global Competitiveness Report*.
- Science Based Targets. (2020). *Science-Based Target Setting Manual Manual para el Establecimiento de Objetivos Basados en Ciencia*.
- Siwec, D., Gajdzik, B., Gawlik, R., Wolniak, R., & Pacana, A. (2025). Open eco-innovations in sustainable product development: Model framework of design thinking in quality life cycle assessment (DT-QLCA). *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 11(1). <https://doi.org/10.1016/j.joitmc.2025.100480>
- SMITH, R., MESA, O., DYNER, I., JARAMILLO, P., POVEDA, G., & VALENCIA, D. (2000). [1] SMITH, R., MESA, O., DYNER, I., JARAMILLO, P., POVEDA, G., VALENCIA, D. (2000). "Decisiones con Múltiples Objetivos e Incertidumbre" 2da edición. Universidad Nacional de Colombia, Facultad. *Con Múltiples Objetivos e Incertidumbre" 2da Edición. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Medellín, Colombia., 2 edición.*
- Socioeconomic Data and Applications Center (sedac). (2022). *Environmental Performance Index, 2022 Release (1950–2022)*.
- Szabo, Z. K., Szádóczki, Z., Bozóki, S., Stanciulescu, G. C., & Szabo, D. (2021). An analytic hierarchy process approach for prioritisation of strategic objectives of sustainable development. *Sustainability (Switzerland)*, 13(4), 1–26. <https://doi.org/10.3390/su13042254>
- United Nations Environment Programme (UNEP). (2021). *Life Cycle Thinking and Assessment for Sustainable Consumption and Production: A Practitioner's Guide*.
- Wang, S., Su, D., Ma, M., & Kuang, W. (2021). Sustainable product development and service approach for application in industrial lighting products. *Sustainable Production and Consumption*, 27, 1808–1821. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.04.003>

7 ANEXOS

7.1 Anexo A. Reporte de revisión de literatura sobre métodos y herramientas para la evaluación del desempeño ambiental

Tabla 9 Resultado de la revisión de literatura académica. Fuente: Elaboración propia

Titulo	Autor / Año	Objetivo del Estudio	Metodología	Principales hallazgos
2022 EPI Framework	Wolf, M. J., et al. (2022)	Medir la proximidad de los países a los objetivos de política ambiental mediante indicadores, destacando líderes y rezagados en desempeño ambiental.	Índice de Desempeño Ambiental (EPI) de 2022 proporciona un resumen basado en datos del estado de la sostenibilidad en todo el mundo	El marco organiza 40 indicadores en 11 categorías de temas y tres objetivos de políticas, con ponderaciones mostradas en cada nivel como porcentaje de la puntuación total.
Hacia un método común para medir la sostenibilidad de los productos y las organizaciones en la Unión Europea	López F, Aloia (2022)	La Comisión Europea promueve la medición y comunicación del comportamiento ambiental de productos y organizaciones a lo largo de su ciclo de vida.	Recomendaciones UE. HAO. HAP. RCHAP.RSHAO. 16 impactos ambientales. Principios HC. Recomendaciones. Fases del método. Plan de Acción de Economía Circular 2020 UE	16 impactos ambientales potenciales Principios de estudio de huella ambiental.

Titulo	Autor / Año	Objetivo del Estudio	Metodología	Principales hallazgos
Sustainable Products in a Circular Economy - Towards an EU Product Policy Framework contributing to the Circular Economy	European Commission (2019)	La UE impulsa la economía circular para mejorar la sostenibilidad, promoviendo la vida prolongada de los productos y la minimización del consumo de recursos.	El Marco de Política de Productos de la UE, Ecodiseño y Etiquetado Energético, Compras Públicas Verdes (GPP), Responsabilidad Extendida del Productor (EPR), Ciclos de Productos en la Economía Circular. Categorías de productos prioritarias para la economía circular. Los métodos de Huella Ambiental.	Instrumentos de política en una economía circular apuntan a mantener el valor de productos mediante eco-innovación y tecnologías ambientales, destacando programas como Horizonte 2020 y la verificación de tecnologías ambientales (ETV).
Índice de Desempeño Ambiental (EPI)	Centro de Aplicaciones y Datos Socioeconómicos SEDAC (2022)	Evaluar cuantitativamente el desempeño ambiental de los países en relación con objetivos ambientales claramente definidos.	Índice de Desempeño Ambiental (EPI) de 2022 proporciona un resumen basado en datos del estado de la sostenibilidad en todo el mundo	El Índice de Desempeño Ambiental (EPI) de 2022 evalúa 180 países basándose en 40 indicadores en 11 categorías: calidad del aire, agua potable, gestión de residuos, biodiversidad, pesca, lluvia ácida, agricultura, recursos hídricos y cambio climático, para medir la salud ambiental, vitalidad de los ecosistemas y cambio climático.

Titulo	Autor / Año	Objetivo del Estudio	Metodología	Principales hallazgos
Green supply chain technology and organization performance: Moderating role of environmental dynamism and product-service innovation capability	Chaudhuri, Ranjan , et al. (2023)	Analizar el impacto de las estrategias de innovación verde en el desempeño organizacional dentro de la cadena de suministro.	Innovación verde, cadena de suministro verde	Los resultados muestran que la adopción de innovación verde (en productos, procesos, logística y servicios) mejora el desempeño de las empresas en sostenibilidad y eficiencia en la cadena de suministro.
New product development and sustainable performance of Chinese SMMEs: The role of dynamic capability and intra-national environmental forces	Liu, Yulong, et al. (2020)	Investigar la relación entre mecanismos ambientales regionales y el desarrollo sostenible de productos y rendimiento de las SMMEs.	El estudio analiza 1,321 muestras de SMMEs en China, utilizando una encuesta nacional para examinar las características del mercado regional y la capacidad dinámica de estas empresas.	Las fuerzas institucionales regionales, la intensidad emprendedora y la capacidad dinámica de las SMMEs moderan cómo el desarrollo de nuevos productos afecta el desempeño sostenible de las empresas, al reducir las limitaciones y dependencias de recursos específicos de las SMMEs.
Indicador de desempeño ambiental bajo el enfoque GSCM: Validación en empresas manufactureras de la región del Eje cafetero	Trujillo, Mariana (2018)	Desarrollar un indicador específico de desempeño ambiental para el enfoque de Gestión de la Cadena de Suministro Verde (GSCM).	Gestión de abastecimiento Verde(Green Supply ChainManagement,GSCM)) propone una metodología integral para diseñar y aplicar el indicador de desempeño ambiental. Esta metodología consta de varias etapas.	Modelo conceptual de las prácticas GSCM identificadas en la literatura Revisión Literatura sobre indicadores para el GSCM Metodología propuesta para el diseño y aplicación del indicador Indicador de medición del

Titulo	Autor / Año	Objetivo del Estudio	Metodología	Principales hallazgos
				desempeño ambiental bajo el enfoque GSCM
Sustainable product development and service approach for application in industrial lighting products	Wang, Shuyi, et al. (2021)	Buscar un equilibrio sostenible entre aspectos ambientales, sociales y económicos en el ciclo de vida de productos.	El enfoque propuesto se basa en dos fases: la fase de desarrollo del producto y la fase de servicio.	El nuevo producto tuvo un impacto ambiental un 46% menor que el del producto existente con la misma salida de luz. Approach for sustainable product development and service.A Flowchart implementing the SPDS procedure
Integrating Life Cycle Assessment in the Product Development Process: A Methodological Approach	Mendes da Luz, Leila (2018)	Integrar el Análisis de Ciclo de Vida (LCA) en el desarrollo de productos para evaluar impactos ambientales.	Selección de un producto representativo para análisis LCA. Realización del LCA del producto seleccionado e integración del LCA en cada fase del proceso de desarrollo del producto.	La metodología propuesta puede ayudar a las empresas a desarrollar productos más sostenibles al considerar los impactos ambientales desde las etapas iniciales del diseño. Research phases for the development of the present study. LCA as a predictive tool in the development of new Products Lca integration to PDP

Titulo	Autor / Año	Objetivo del Estudio	Metodología	Principales hallazgos
ECOLOGICAL ENGINEERING & ENVIRONMENTAL TECHNOLOGY	(Majerník et al., 2023)	Analizar el impacto ambiental y la sostenibilidad de sistemas de productos, equilibrando aspectos socioeconómicos y ambientales.	La norma ISO 14045 usa los estándares LCA ISO 14040 y 14044 para evaluar impactos ambientales del producto a lo largo de su ciclo de vida. También aborda los impactos y riesgos medioambientales gestionados por EMS según ISO o EMASIII.	Incorporación de indicadores de "crecimiento económico verde" de la OCDE y evaluación de la sostenibilidad de la producción, junto con una fórmula del desempeño ambiental. Se incluye un modelo para evaluar las fases del ciclo de vida del producto y la integración de esta evaluación con la sostenibilidad en el desarrollo de productos.
The investigation of environmental sustainability within product design: a critical review	(Delaney et al., 2022)	Identificar cómo el diseño de productos puede mejorar su sostenibilidad ambiental a través de factores fundamentales.	Realiza una revisión exhaustiva de la literatura durante las últimas cuatro décadas. Se analizan tendencias y se identifican los factores clave que pueden afectar la sostenibilidad ambiental en el proceso de diseño de productos.	Los factores clave para mejorar la sostenibilidad ambiental incluyen los "6Rs" (Reducir, Reutilizar, Reciclar, Rediseñar, Remanufacturar, Recuperar), gestión de residuos y energía, y análisis del ciclo de vida del producto.
Análisis de Ciclo de Vida (ACV): qué es y para qué sirve	Eurofins (2024)	Utilizar el análisis de ciclo de vida para identificar impactos ambientales principales de un producto en todas sus etapas.	ACV UNICAMENTE	Inventario del Ciclo de Vida (ACV) Evaluación de los Impactos del Ciclo de Vida Interpretación de resultados Metodologías: ISO 14040, ISO 14041, ISO 14042, ISO 14043:, ISO 14044.

7.2 Anexo B. Herramienta de análisis para la selección de métodos de evaluación y medición del desempeño ambiental de un producto

